Contrats : CPS 14-15-01, avenant numéro 1, CPS 17-18-03

RAPPORT FINAL

AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE DU RISQUE RELIÉ AUX INONDATIONS – BRIGHAM

Version publique

Remis à :

MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE

Par :

Karem Chokmani

(INRS - Centre Eau Terre Environnement)

Décembre, 2018

© Institut National de la Recherche Scientifique, 2018

Note 1 :

Ce projet a été financé par le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec [contrat CPS 14-15-01 et avenant nº 1 et contrat CPS 17-18-03]. Le montant total des contrats est de 163 125 $.

Note 2 :

Le présent rapport constitue les rapports finaux du contrat CPS 14-15-01 et de l'avenant nº 1 ainsi que du contrat CPS 17-18-03.

Note 3 :

Le présent rapport constitue la version publique du rapport et ne contient pas d'informations confidentielles (renseignements personnels notamment). Il existe une version MSP du rapport dans laquelle ces informations confidentielles sont présentes.

À ce titre, les numéros civiques réels ont été remplacés par des numéros civiques fictifs n'existant pas.

Table des matières

Liste des figures 5
Liste des tableaux 8
1 Introduction 10
1.1 Mise en contexte 10
1.2 Objectifs 10
1.3 Description de la zone à l'étude 11
2 Méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen d'inondations 13
2.1 Étude hydrologique 13
2.1.1 Description de la méthode 13
2.1.2 Résultats de la modélisation hydrologique 16
2.1.3 Analyse statistique des données hydrométriques mises à jour 18
2.2 Modélisation hydraulique 23
2.2.1 Objectif 23
2.2.2 Modélisation 2D sous HEC-RAS version 5.0 23
2.2.3 Données nécessaires pour la calibration du modèle 24
2.2.4 Calibration du modèle hydraulique 2D 28
2.2.5 Production de résultats cartographiques 32
2.3 Étude du dommage 39
2.4 Évaluation du dommage annuel moyen 45
3 Portrait financier du risque d'inondations 47
3.1 Portrait des inondations historiques récentes 47
3.1.1 Objectif 47
3.1.2 Méthodologie et analyse des données 47
3.2 Évaluation du dommage annuel moyen 52
3.2.1 Objectif 52
3.2.2 Description des données de bâtiments 52
3.2.3 Résultats 54
4 Évaluation du risque aux personnes et aux véhicules 57
4.1.1 Objectif 57

4.1.2 Méthodologie 57
4.1.3 Cartographie du risque aux personnes et aux véhicules 58
5 Évaluation des mesures de gestion et de mitigation contre les risques d'inondations 62
5.1 Évaluation des coûts et des avantages des mesures de mitigation 62
5.1.1 Méthodologie 62
5.1.2 Scénario 1 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le secteur du méandre 65
5.1.3 Scénario 2 : Immunisation des résidences principales 66
5.1.4 Scénario 3 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le secteur du méandre et immunisation des bâtiments 67
5.1.5 Scénario 4 : Rehaussement de certaines sections de rues publiques 67
5.1.6 Analyse des résultats 78
5.2 Évaluation des coûts d'outils de planification et de mesures de prévention 79
5.2.1 Mise à jour de la cartographie des zones inondables 79
5.2.2 Mise en place d'un système d'alerte précoce 79
5.2.3 Conception de repères de crue 81
6 Impact des changements climatiques sur le risque d'inondations 83
7 Conclusion 85
8 BIBLIOGRAPHIE 86
ANNEXE 1 : LOCALISATION DES SECTIONS TRANSVERSALES 87
ANNEXE 2: DESCRIPTION DU SUBSTRAT DES PLAINES 88
ANNEXE 3 : INVENTAIRE DES BÂTIMENTS 89
ANNEXE 4 : HAUTEUR DU PREMIER PLANCHER 91
ANNEXE 5 : CARTES DES PROFONDEURS D'EAU 92
ANNEXE 6 : CARTES DES VITESSES D'ECOULEMENT 98
ANNEXE 7 : CARTOGRAPHIE DES RISQUES LIÉS AUX INONDATIONS 104
ANNEXE 8 : QUESTIONNAIRE AUPRÈS DES RÉSIDENTS DE LA ZONE À L'ÉTUDE À BRIGHAM 110
ANNEXE 9 : RAPPORT DÉTAILLÉ DE L'ARPENTEUR-GÉOMÈTRE CONTENANT LA HAUTEUR DE PREMIERS PLANCHERS 115
ANNEXE 10 : RAPPORT D'INGÉNIEUR CIVIL 116
ANNEXE 11 : RAPPORT DU GRAPHISTE POUR LA CONCEPTION D'UN REPÈRE DE CRUE 117

Liste des figures

Figure 1 : Secteur à l'étude – Municipalité de Brigham 11
Figure 2 : Bassin versant de la rivière Yamaska (CEHQ, 2004) 12
Figure 3 : Étapes de détermination des débits de crues pour le secteur étudié (CEHQ, 2004) 15
Figure 4 : Courbe débit-probabilité de non-dépassement (au point F) 16
Figure 5: Débits journaliers maximaux annuels entre 1984 et 2016 19
Figure 6: Résidus normalisés issus de la régression des débits journaliers maximaux annuels en fonction des années 21
Figure 7 : Position des sections transversales établies par le CEHQ pour la modélisation du tronçon de la rivière Yamaska 24
Figure 8 : Localisation des sections transversales. Tronçon de la rivière Yamaska. Secteur Brigham (en vert, sections réalisées par l'équipe de l'INRS et en rouge, sections réalisées par le CEHQ en 2000) 26
Figure 9 : Mesure bathymétrique le long d'une section transversale de la rivière Yamaska (secteur Brigham, pont du Decelles) 27
Figure 10 : Section transversales 78, 77 et 76 de la rivière Yamaska (secteur 27
Figure 11 : Carte d'occupation du sol 29
Figure 12: Variabilité du coefficient de Manning (1) n : 0,08 ; arbre, végétation haute épaisse, mauvaises herbes (2) n : 0,045 végétation haute et épaisse (3) n : 0,03 végétation basse (4) n : 0,03 terre non cultivée, végétation basse 29
Figure 13 : Réseau de maillage 2D du secteur Choinière-Decelles-Fortin a la maille définie pour toute la zone à l'étude, b- un zoom pour la partie en rouge 30
Figure 14 : Exemple d'une courbe débit-niveau issue d'une régression polynomiale d'ordre 4. 33
Figure 15 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 2 ans. 34
Figure 16 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 20 ans. 35
Figure 17 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 100 ans. 36
Figure 18 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 2 ans 37
Figure 19 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 20 ans 38
Figure 20 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 100 ans 39
Figure 21 : Définition de la hauteur de submersion : $H = h - ZR.C$. *(Bonnifait, 2005)* ... 40
Figure 22 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage sans sous-sol 41
Figure 23 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol fini 42
Figure 24 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini 42
Figure 25 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages sans sous-sol 43
Figure 26 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini 44
Figure 27 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini 44
Figure 28 : Méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen d'inondation 46

Figure 29 : Méthode de calcul du dommage annuel moyen d'inondations 46
Figure 30: Subdivision de la zone à l'étude en trois secteurs 48
Figure 31 : Pourcentage du dommage pour les bâtiments par secteur 50
Figure 32 : Inventaire des résidences du secteur d'étude 53
Figure 33 : Type de résidence (principale ou secondaire) pour les bâtiments étudiés ... 54
Figure 34 : Histogrammes des DAM des résidences principales pour les récurrences < 100 ans *(a) en pourcentage (b) en dollar*..... 56
Figure 35 : Carte de risque pour la récurrence 2 ans 59
Figure 36 : Carte de risque pour la récurrence 20 ans 60
Figure 37 : Carte de risque pour la récurrence 100 ans..... 61
Figure 38 : Carte de profondeur d'eau pour un événement de récurrence 100 ans..... 68
Figure 39 : Profil de la rue Decelles pour une récurrence de 100 ans, résultats obtenus par simulation sous HEC RAS 5.0.3..... 70
Figure 40 : Profil du chemin Choinière pour une récurrence de 100 ans, résultats obtenus par simulation sous HEC RAS 5.0.3 71
Figure 41: Sections à remblayer de la route Decelles 72
Figure 42: Scénario de rehaussement de la rue Decelles à hauteur de 50 cm en dessous du niveau d'eau pour la récurrence 100 ans 73
Figure 43: Sections à remblayer du chemin Choinière..... 74
Figure 44 : Scénario de rehaussement du chemin Choinière à hauteur de 50 cm en dessous du niveau d'eau pour la récurrence 100 ans 75
Figure 45 : Carte de risque pour la récurrence 2 ans, a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière 77
Figure 46 : Carte de risque pour la récurrence 20 ans a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière 77
Figure 47 : Carte de risque pour la récurrence 100 ans a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière..... 78
Figure 48 : Concept général du repère de crue proposé 81
Figure 49 : Endroits proposés pour l'installation des repères de crue 82
Figure 50 : débits futurs pour les récurrences : (a) 2 ans et (b) 20 ans 84
Figure 51 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 2 ans..... 92
Figure 52 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 5 ans..... 93
Figure 53 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 10 ans..... 94
Figure 54 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 20 ans..... 95
Figure 55 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 50 ans..... 96
Figure 56 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 100 ans 97
Figure 57 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 2 ans..... 98
Figure 58 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 5 ans..... 99
Figure 59 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 10 ans..... 100
Figure 60 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 20 ans..... 101
Figure 61 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 50 ans..... 102
Figure 62 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 100 ans 103

Figure 63 : Carte du risque pour la récurrence 2 ans 104
Figure 64 : Carte du risque pour la récurrence 5 ans 105
Figure 65 : Carte du risque pour la récurrence 10 ans 106
Figure 66 : Carte du risque pour la récurrence 20 ans 107
Figure 67 : Carte du risque pour la récurrence 50 ans 108
Figure 68 : Carte du risque pour la récurrence 100 ans 109

Liste des tableaux

Tableau 1 : Débits de crue de récurrence 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans pour la rivière Yamaska – secteur d'Adamsville 17
Tableau 2: Débits de crue instantanés de récurrence 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans pour la rivière Yamaska – secteur d'Adamsville 17
Tableau 3: Débits maximums journaliers (: années ajoutées depuis le rapport du PDCC)* 18
Tableau 4: Statistiques descriptive de l'échantillon 18
Tableau 5 : Liste des données nécessaires à la conception du modèle hydraulique 2D sous HEC RAS version 5.0 25
Tableau 6 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées par le modèle 2D du tronçon étudié de la rivière Yamaska 32
Tableau 7: Fonction de dommage pour les résidences à un étage sans sous-sol 41
Tableau 8: Fonction de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol fini 41
Tableau 9: Fonction de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini 42
Tableau 10: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages sans sous-sol 43
Tableau 11: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini 43
Tableau 12: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini 44
Tableau 13 : Données d'aide financière du MSP 49
Tableau 14 : Données d'aide financière du MSP pour les résidents 49
Tableau 15 : Données d'aide financière du MSP pour résidences regroupées par secteur 50
Tableau 16 : Données d'aide financière du MSP pour la municipalité de Brigham 51
Tableau 17 : Données de dommage déclarées par les citoyens 51
Tableau 18 : Données de dommage déclarées par les citoyens regroupées par secteur 52
Tableau 19 : DAM des résidences principales pour les récurrences < 100 ans 55
Tableau 20 : Tableau d'appréciation du risque 57
Tableau 21 : Liste des résidences à retirer 65
Tableau 22 : Analyse coût-bénéfice correspondant au premier scénario de mitigation 66
Tableau 23 : Analyse coût-bénéfice correspondant au deuxième scénario de mitigation 66
Tableau 24 : Analyse coût-bénéfice correspondant au deuxième scénario de mitigation – Immunisation des résidences avec un DAM > 100 $ 66
Tableau 25 : Analyse coût-bénéfice correspondant au troisième scénario de mitigation 67
Tableau 26 : Analyse coût-bénéfice correspondant au troisième scénario de mitigation - Immunisation des résidences avec un DAM > 100 $ 67
Tableau 27 : Rapport avantages/coûts et indice VAN pour les scénarios étudiés 79

Tableau 28 : Estimation des coûts de mise en place d'un système d'alerte à Brigham.. 80
Tableau 29 : Impact des scénarios de changement climatique sur le débit de la rivière Yamaska en aval du secteur à l'étude 83
Tableau 30: dommage associé aux récurrences 2 et 20 ans pour les débits futurs : 2030, 2050 et 2080..... 84
Tableau 31 : Position GPS des sections transversales_Yamaska, secteur Brigham (Système de coordonnée géographique : GCS_North American_1983)..... 87
Tableau 32 : Liste des résidences identifiées sur le secteur à l'étude 89
Tableau 33 : Hauteur du premier plancher pour les résidences principales 91

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Les inondations représentent la catastrophe naturelle la plus fréquente et la plus dommageable au Québec. La municipalité de Brigham est l'une des régions les plus touchées par cette catastrophe à une fréquence qui peut atteindre jusqu'à deux à trois fois par année. Depuis l'évènement Irène de l'année 2011, qui a engendré des dégâts socio-économiques considérables, la question de l'évaluation et de la gestion du risque d'inondation est devenue de plus en plus cruciale pour les autorités locales. Des approches se basant seulement sur la caractérisation de l'aléa (ex. étendue des zones inondables, profondeur de submersion) sans tenir compte des aspects liés à la vulnérabilité sont généralement adoptées pour gérer le risque d'inondation. Dans la perspective d'améliorer la connaissance de ce risque, une nouvelle approche combinant ces deux volets (aléa et vulnérabilité) a été proposée dans le présent travail. L'application de cette approche a permis d'estimer le coût moyen de dommage annuel engendré par les inondations sur les résidences principales à Brigham. Cette étude a également permis de dresser un portrait financier du risque d'inondations pour ce secteur et d'évaluer le risque aux véhicules et aux personnes. Quelques mesures de gestion pour faire face au risque d'inondations ont été finalement étudiées à travers une analyse coût-bénéfice ainsi que l'évaluation de leurs impacts sur la sécurité des personnes.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude seront utiles pour les autorités locales de la municipalité de Brigham afin d'appuyer leurs décisions en matière de gestion de risque et de prévention contre les inondations.

1.2 Objectifs

L'objectif principal de cette étude, confiée par le ministère de la Sécurité publique (MSP) consiste à améliorer la connaissance du risque d'inondations pour la municipalité de Brigham. Pour ce faire, quatre sous-objectifs ont été réalisés :

- Développer une méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen pour les bâtiments
- Dresser un portrait financier du risque d'inondation
- Évaluer le risque d'inondation sur les personnes
- Évaluer certaines mesures de gestion du risque d'inondation

1.3 Description de la zone à l'étude

La présente étude a été menée sur le territoire de Brigham, une municipalité située dans le MRC de Brome-Missisquoi en Montérégie. Le secteur étudié est délimité par les rues Decelles et Fortin et le chemin Choinière et est traversé par la rivière Yamaska (voir figure 1). Cette rivière prend sa source dans le lac Brome, situé dans la ville Lac-Brome. Elle coule sur une distance d'environ 160 km et elle se jette dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur du lac Saint-Pierre. La superficie totale de son bassin versant est de 4 787 km^2 (voir figure 2) (CEHQ, 2004). Le tronçon de la rivière étudié est d'environ 3 km de long et 25 m de large en moyenne. Ce tronçon traverse une zone résidentielle et est coupé par les ponts Perron et Decelles.

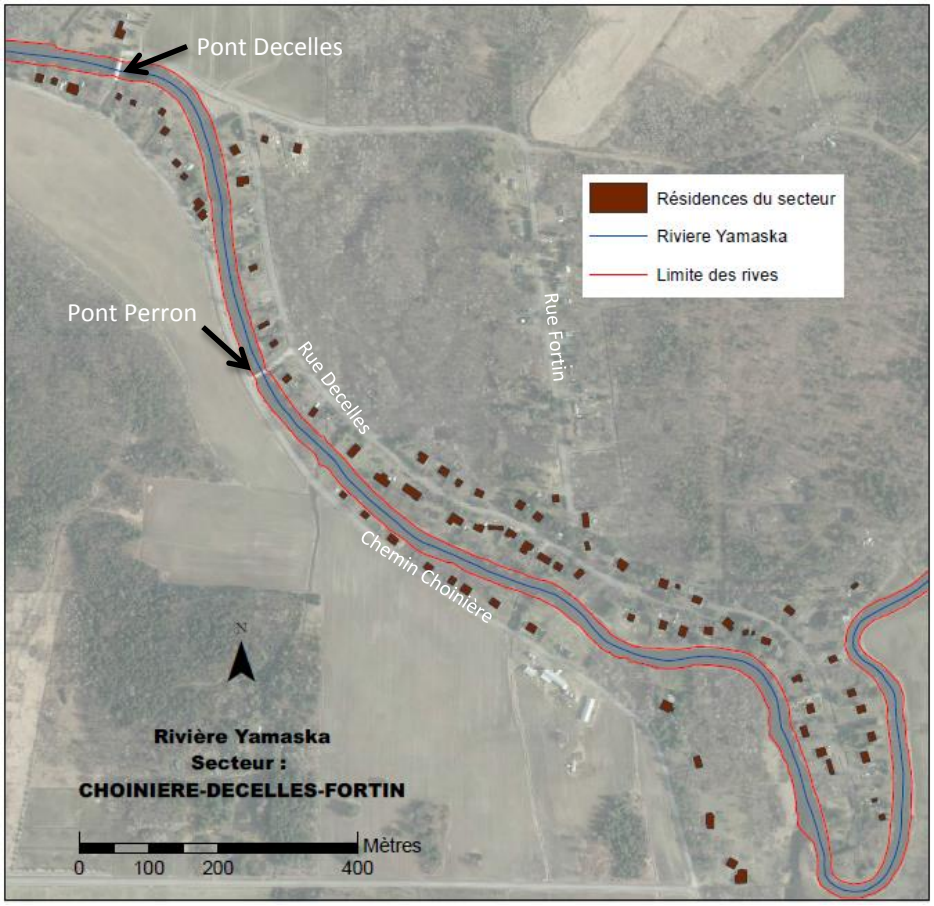


Figure 1 : Secteur à l'étude – Municipalité de Brigham

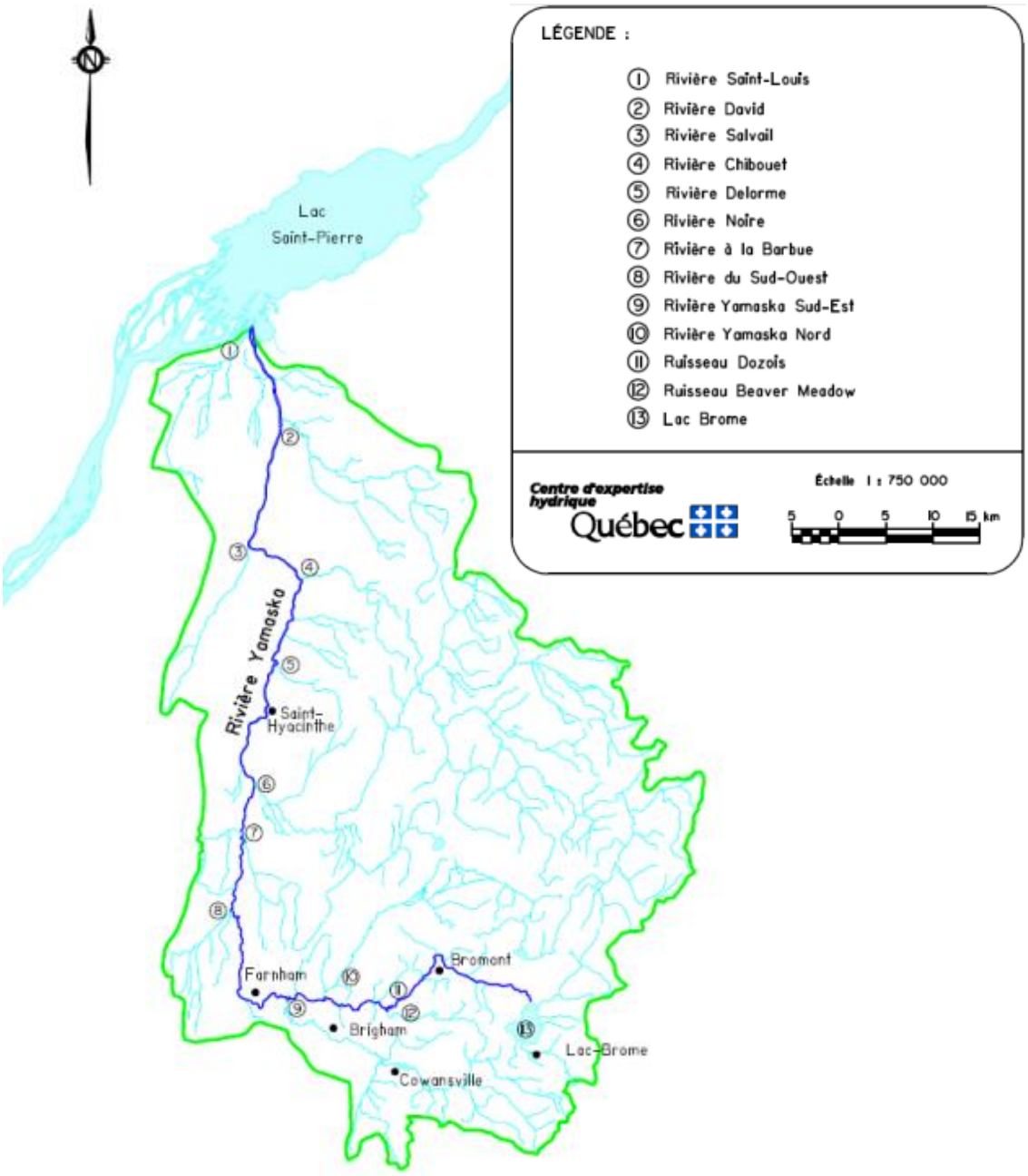


Figure 2 : Bassin versant de la rivière Yamaska (CEHQ, 2004)

2 Méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen d'inondations

Afin d'évaluer le risque d'inondations dans le secteur à l'étude, le dommage annuel moyen causé par les inondations sur les bâtiments a été calculé. Pour ce faire, une approche méthodologique composée de quatre étapes a été développée. Cette approche est composée d'une étude hydrologique, une modélisation hydraulique, une étude de dommage et une simulation du coût annuel du dommage.

2.1 Étude hydrologique

2.1.1 Description de la méthode

Le but de cette étude consiste à établir une relation de type débit-probabilité qui permet de lier chaque débit mesuré à une probabilité (ou encore à une période de retour). Cette relation permet de déterminer les débits de crues de récurrence 2, 5 10, 20, 50 et 100 ans dans le tronçon de la rivière Yamaska étudié. Pour ce faire, une analyse statistique des débits maximums annuels enregistrés dans une station hydrométrique est appliquée. Cette méthodologie est décrite d'une façon détaillée dans le rapport élaboré par le CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec) dans le cadre du PDCC (Programme de Détermination des Cotes de Crues) (CEHQ, 2004). Elle se base principalement sur la technique de « transfert de bassin versant ». Cette technique est généralement utilisée lorsque la station hydrométrique retenue est éloignée du secteur étudié. Son principe consiste à transposer les débits de crues mesurés vers le secteur étudié en fonction de la superficie des bassins versants des deux sites. Cette transposition peut être réalisée à l'aide de l'équation suivante:

$$Q_2 = Q_1 * \left[\frac{A_2}{A_1}\right] \quad (1)$$

Où : Q_2 est le débit au secteur désiré

Q_1 est le débit à la station hydrométrique

A_2 est la superficie du bassin versant du secteur désiré

A_1 est la superficie du bassin versant à la station hydrométrique

L'étude hydrologique de la rivière Yamaska dans le secteur d'Adamsville a été réalisée en se basant sur des données enregistrées dans la station hydrométrique 030302 située à Farnham. Ces données sont exploitées afin de transposer les débits jusqu'au secteur

d'étude, et ce, en soustrayant les débits provenant des principaux tributaires (i.e. Yamaska Sud-Est, Yamaska Nord). Cette méthode est décrite ci-dessous (voir figure 3):

1) La station 030302 permet de calculer le débit moyen journalier de la rivière Yamaska à cet endroit pour chaque jour de l'année.
2) À l'aide de la méthode de transfert de bassin versant (équation ci-haut), le débit moyen journalier à l'aval du confluent des rivières Yamaska Sud-Est et Yamaska (point A) a été calculé.
3) Le débit au point C est obtenu en soustrayant le débit moyen journalier de la rivière Yamaska Sud-Est à son embouchure du débit au point A. Le débit au point B est obtenu en transposant les données de la station 030314.
4) Le débit au point D (l'aval du confluent des rivière Yamaska Nord et Yamaska) est obtenu en transposant le débit obtenu au point C.
5) Le débit moyen journalier en amont de ce second confluent (point F) est calculé en soustrayant le débit moyen journalier de la rivière Yamaska Nord à son embouchure du débit au point D. Le débit au point E est estimé en transposant les données enregistrées à la station 030340.
6) Les débits issus de l'étape 5 ont fait l'objet d'une analyse statistique (voir paragraphe 2.1.2). Enfin, les débits de crue de différentes récurrences obtenues sont transposés au secteur étudié (point G)

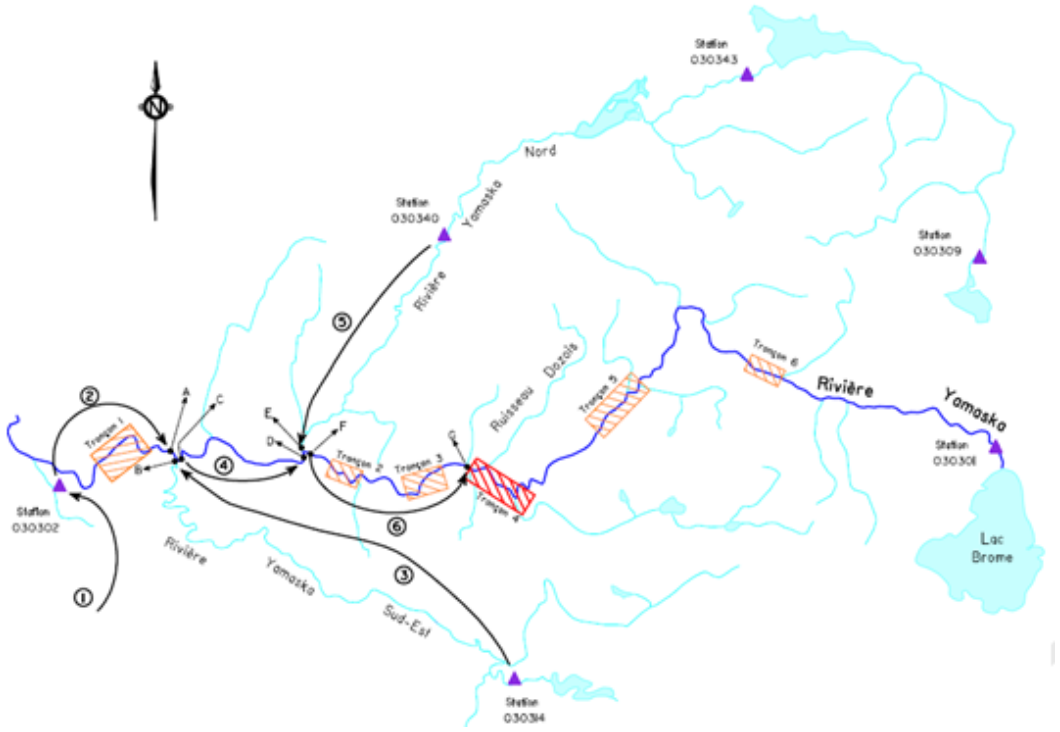


Figure 3 : Étapes de détermination des débits de crues pour le secteur étudié (CEHQ, 2004)

Les débits obtenus à la suite de l'application de la méthodologie décrite ci-haut (pour les résultats détaillés, voir CEHQ, 2004) doivent être majorés par un facteur de pointe, puisque les dommages causés lors d'une crue sont directement liés au niveau d'eau maximum atteint, même s'il est d'une courte durée. La valeur du débit maximum instantané doit donc être prise en compte afin de déterminer les zones inondables. Pour l'évaluation de ce facteur de majoration l'équation suivante a été utilisée (CEHQ, 2004):

$$FP = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Q_{inst}}{Q_{moy}}}{n}\right] \quad (2)$$

Où : Q_{inst} est le débit de crue instantané enregistré à la station

Q_{moy} est le débit de crue moyen enregistré à la station

n est le nombre de crues printanières dont le débit maximum instantané est connu

i est une crue donnée

2.1.2 Résultats de la modélisation hydrologique

L'étude menée dans le cadre du PDCC a permis de sélectionner 19 valeurs de débits de crues historiques extraites à partir des débits moyens journaliers. Ces débits ont été transposés en amont de la confluence entre la rivière Yamaska et Yamaska Nord. L'analyse fréquentielle des débits obtenus a permis d'établir la relation débit – probabilité (voir figure 4). Cette relation est définie par une loi gamma inverse de paramètres :

- Paramètre de forme : 11.9004
- Paramètre d'échelle : 1002.8328

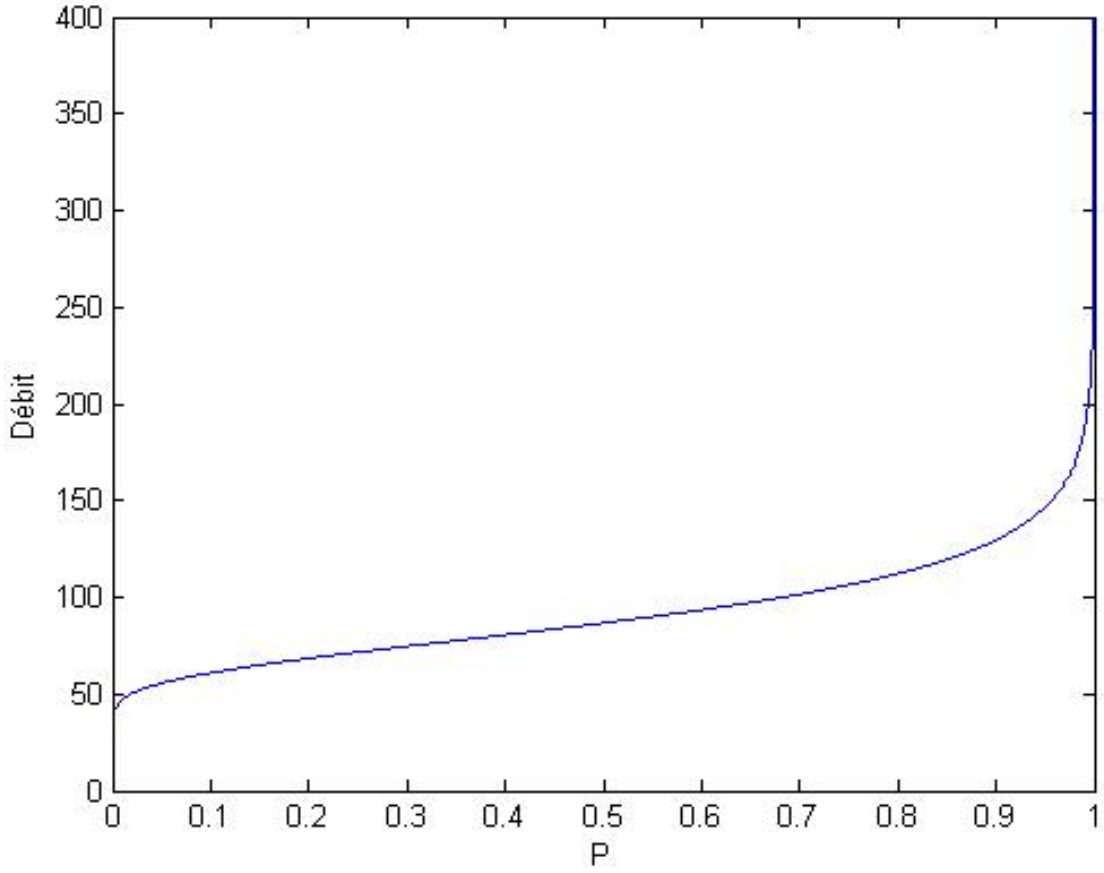


Figure 4 : Courbe débit-probabilité de non-dépassement (au point F)

La relation débit-probabilité établie a permis d'associer une probabilité (ou une période de retour) aux différents débits qui seront utilisés dans cette étude. Le tableau ci-dessous présente les débits de crues correspondant aux différentes périodes de retour.

Tableau 1 : Débits de crue de récurrence 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans pour la rivière Yamaska – secteur d'Adamsville

Secteur	Aire du bassin versant (km^2)	Débits de crue (m^3/s)					
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Amont de la confluence avec la rivière Yamaska Nord (F)	453	86.7	112.1	129.5	146.6	169.4	186.9
Aval du secteur d'étude (G)	425	81.3	105.2	121.5	137.5	158.9	175.3
Amont du secteur d'étude	350	67.0	86.6	100.1	113.3	130.9	144.4

Les débits maximums annuels représentés dans le tableau précédent sont évalués à partir des moyennes journalières. Afin de tenir compte de la valeur de débit maximum instantané, les débits obtenus ont été majorés par un facteur de pointe (CEHQ, 2004). Pour le secteur étudié, ce facteur a été évalué à 1.19 (CEHQ, 2004) en se basant sur les données provenant des stations hydrométriques avoisinantes (030301, 030302, 030314 030309, 030340, et 030343). Ce facteur de pointe représente une moyenne représentative de la région hydrographique. Les débits de crues instantanés obtenus à la suite de la majoration par le facteur de pointe estimé sont présentés dans le tableau ci-dessous. Il faut cependant noter, que le débit de récurrence de 2 ans n'est pas multiplié par ce facteur, car pour cette période de retour les résultats devraient se rapprocher de ceux d'une ligne des hautes eaux (CEHQ, 2004).

Tableau 2: Débits de crue instantanés de récurrence 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans pour la rivière Yamaska – secteur d'Adamsville

Secteur	Aire du bassin versant (km^2)	Débits de crue (m^3/s)					
		2 ans*	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Amont de la confluence avec la rivière Yamaska Nord (F)	453	86.7	133.4	154.1	174.5	201.6	222.4
Aval du secteur d'étude (G)	425	81.3	125.2	144.6	163.7	189.1	208.7
Amont du secteur d'étude	350	67.0	118.4	136.8	154.8	178.9	197.4

*Débits non majorés par le facteur de pointe

2.1.3 Analyse statistique des données hydrométriques mises à jour

2.1.3.1 Description des données

Au total, 33 valeurs de débits maximums annuels ont été extraites à partir des débits moyens journaliers transposés en amont de la confluence entre les rivières Yamaska et Yamaska Nord (voir tableau 3). Ces 33 valeurs ont été utilisées pour réaliser une analyse statistique en amont de la confluence entre les rivières Yamaska et Yamaska Nord. Les résultats de cette analyse sont présentés ci-après.

Tableau 3: Débits maximums journaliers (: années ajoutées depuis le rapport du PDCC)*

Données du PDCC		**Nouvelles données**	
Année	Débits ($m^3.s^{-1}$)	Année	Débits ($m^3.s^{-1}$)
1984	99,19	2003*	65,87
1985	75,69	2004*	105,58
1986	107,23	2005*	107,46
1987	88,93	2006*	164,45
1988	73,36	2007*	68,78
1989	150,75	2008*	65,90
1990	74,6	2009*	82,60
1991	71,77	2010*	162,47
1992	76,33	2011*	131,46
1993	92,57	2012*	66,30
1994	103,69	2013*	88,24
1995	88,78	2014*	104,39
1996	131,45	2015*	65,34
1997	72,27	2016*	75,82
1998	174,75		
1999	62,31		
2000	74,67		
2001	85,99		
2002	52,89		

Tableau 4: Statistiques descriptive de l'échantillon

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Débits	33	0	33	52,890	174,750	94,300	32,024

2.1.3.2 Tests statistiques

Plusieurs tests statistiques ont été effectués afin de définir et caractériser la série temporelle de débits journaliers maximaux annuels.

- **Test de tendance de Mann-Kendall**

Le test de Mann-Kendall sert à déterminer avec un test non paramétrique si une tendance est identifiable dans une série temporelle. L'hypothèse nulle H0 de ce test est défini par l'absence de tendance. Les trois hypothèses alternatives de tendance négative, non nulle ou positive peuvent être choisies.

Les tests de Mann-Kendall s'appuient sur le calcul du taux de Kendall mesurant l'association entre deux échantillons et lui-même basé sur les rangs à l'intérieur des échantillons.

Tau de Kendall	-0,061
S	-32,000
p-value (bilatérale)	0,634
alpha	0,05

Interprétation du test :

H0 : Il n'y a pas de tendance dans la série

H1 : Il existe une tendance dans la série

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 63.38%.

Il n'y a donc pas de tendance observable sur l'échantillon des débits (voir figure 5).

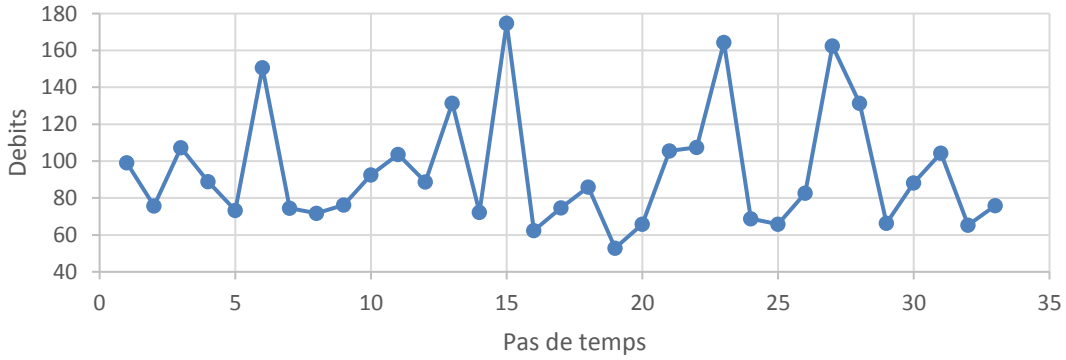


Figure 5: Débits journaliers maximaux annuels entre 1984 et 2016

- **Test d'homogénéité**

Le test de Pettitt est un test non paramétrique ne nécessitant aucune hypothèse quant à la distribution des données. Le test de Pettitt est une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement.

K	66,000
t	15
p-value (bilatérale)	0,738
alpha	0,05

La p-value a été calculée en utilisant 10000 simulations Monte Carlo.

Intervalle de confiance à 99% autour de la p-value :] 0.727; 0.750[

Interprétation du test :

H0 : Les données sont homogènes

H1 : Il y a une date à partir de laquelle il y a un changement dans les données

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Les données sont donc homogènes.

- **Test de stationnarité**

Les tests de stationnarité permettent de vérifier si une série est stationnaire ou non. Une série temporelle est dite stationnaire si ses propriétés statistiques ne varient pas dans le temps (espérance, variance, auto-corrélation). Le test de stationnarité KPSS (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin) est ici utilisé.

Test de KPSS (Tendance / Décalage : Court / Debits) :	
Eta (Valeur observée)	0,038
Eta (Valeur critique)	0,143
p-value (unilatérale)	0,915
alpha	0,05

Interprétation du test :

H0 : La série est stationnaire.

Ha : La série n'est pas stationnaire.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 91.51%.

La série est donc considérée comme stationnaire.

2.1.3.3 Analyse statistique des résidus

Une régression linéaire entre les débits journaliers maximaux annuels en fonction des années a été déterminée selon l'équation suivante :

$$Débits = 116.52 - (1{,}11 * 10^{-2}) * Année \quad (3)$$

Les résidus sont présentés à la figure 6.

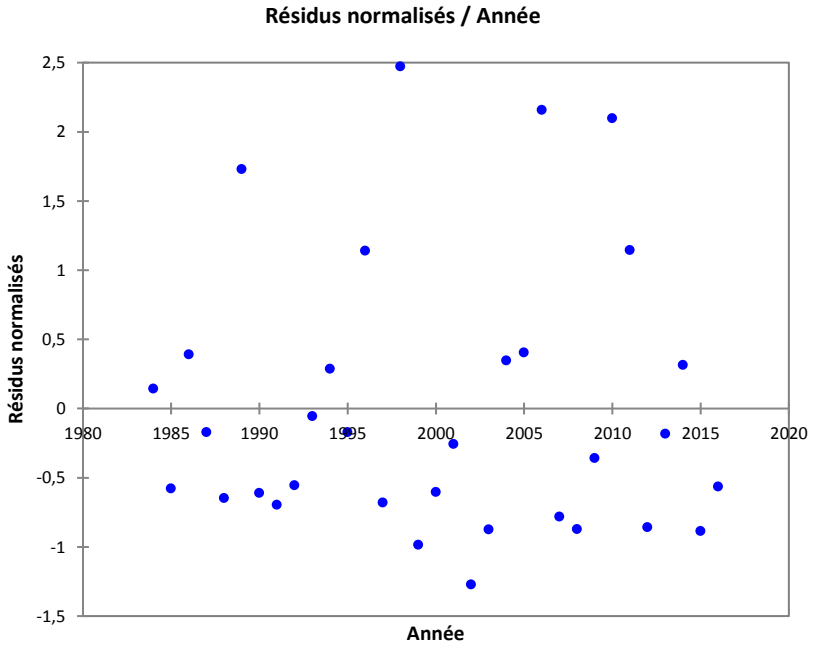


Figure 6: Résidus normalisés issus de la régression des débits journaliers maximaux annuels en fonction des années

- **Test de Durbin-Watson**

Le test de Durbin-Watson est utilisé pour détecter l'autocorrélation entre les résidus d'une régression linéaire. Dans la pratique, les termes d'erreurs sont souvent autocorrélés, ce qui peut entraîner une mauvaise estimation des paramètres.

U	2,218
p-value	0,792
alpha	0,05

Interprétation du test :

H0 : Les résidus ne sont pas autocorrélés

H1 : Les résidus décrivent un processus AR(1)

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 79.18%.

Il n'apparait pas d'autocorrélation entre les résidus de la régression.

- **Test d'hétéroscédacticité**

Le concept d'hétéroscédasticité - son contraire étant l'homoscédasticité - est utilisé en statistique, et plus particulièrement dans le contexte de la régression linéaire ou de l'étude de séries chronologiques, pour décrire le cas où la variance des erreurs du modèle n'est pas la même pour toutes les observations, alors que souvent, l'une des hypothèses de base en modélisation est que les variances sont homogènes et que les erreurs du modèle sont identiquement distribuées.

En régression linéaire, le fait que les erreurs (ou résidus) du modèle ne soient pas homoscédastiques a pour conséquence que les coefficients du modèle estimés par la méthode des moindres carrés ordinaires ne sont ni sans biais ni ceux de variance minimale et l'estimation de leur variance n'est pas fiable.

Test de White :	
LM (Valeur observée)	0,489
LM (Valeur critique)	5,991
DDL	2
p-value (bilatérale)	0,783
alpha	0,05

Interprétation du test :

H0 : Les résidus sont homoscédastiques

Ha : Les résidus sont hétéroscédastiques

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au seuil de signification alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 78.31%.

Les résidus du modèle sont donc homoscédastique.

2.1.3.4 Conclusions

L'analyse statistique des données de débits journaliers maximaux annuels entre 1984 et 2016 montre une stationnarité et une homogénéité dans la série temporelle. Aucune tendance ne se dégage qu'elle soit positive ou négative. L'analyse des résidus de la régression entre les débits maximaux et les années ne montre aucune autocorrélation et hétéroscédasticité. **En conclusion, l'ajout de 14 années (2003-2016) aux données du CEHQ collectées pour le PDCC ne vient pas modifier les récurrences associées aux débits de la rivière.**

2.2 Modélisation hydraulique

2.2.1 Objectif

L'objectif principal de cette étude est de développer un modèle hydraulique à deux dimensions (2D) du tronçon situé au secteur Choinière-Decelles-Fortin de la rivière Yamaska. Cette modélisation permet d'effectuer des simulations de l'étendue des plaines inondables, de la profondeur de submersion et de la vitesse d'écoulement. Six scénarios de crues potentielles ont été simulés, soient les scénarios de crues de récurrences 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

2.2.2 Modélisation 2D sous HEC-RAS version 5.0

Le logiciel HEC-RAS, Hydrologic Engineering Centers River Analysis Systems (Système d'Analyse des Rivières du Centre d'Ingénierie Hydrologique) (USACE, 2016) a été utilisé pour la modélisation hydraulique du tronçon étudié de la rivière Yamaska. Dans le cadre du PDCC, un premier modèle a été réalisé en 2001 pour ce même tronçon de rivière par le CEHQ. Ce modèle d'une seule dimension (1D) a permis de simuler des hauteurs d'eau le long du tronçon de la rivière.

La modélisation unidimensionnelle comprend uniquement des éléments 1D tels que la rivière, les tributaires ou encore les structures hydrauliques (les ponts, les digues et les ponceaux). Les informations concernant ces structures hydrauliques (position, dimensions, rugosité etc.), la variabilité morphologique de la rivière et ses caractéristiques hydrauliques sont intégrées par l'intermédiaire de sections transversales positionnées le long du tronçon d'étude, perpendiculairement à l'écoulement. La figure 7 présente les

positions de sections transversales établies par le CEHQ pour le modèle 1D du secteur à l'étude. Le niveau de qualité des résultats est dépendant du nombre et du niveau de précision des sections. De plus, les données d'entrées (topographie, hauteur d'eau, pente, rugosité, etc.) sont interpolées entre chacune des sections.

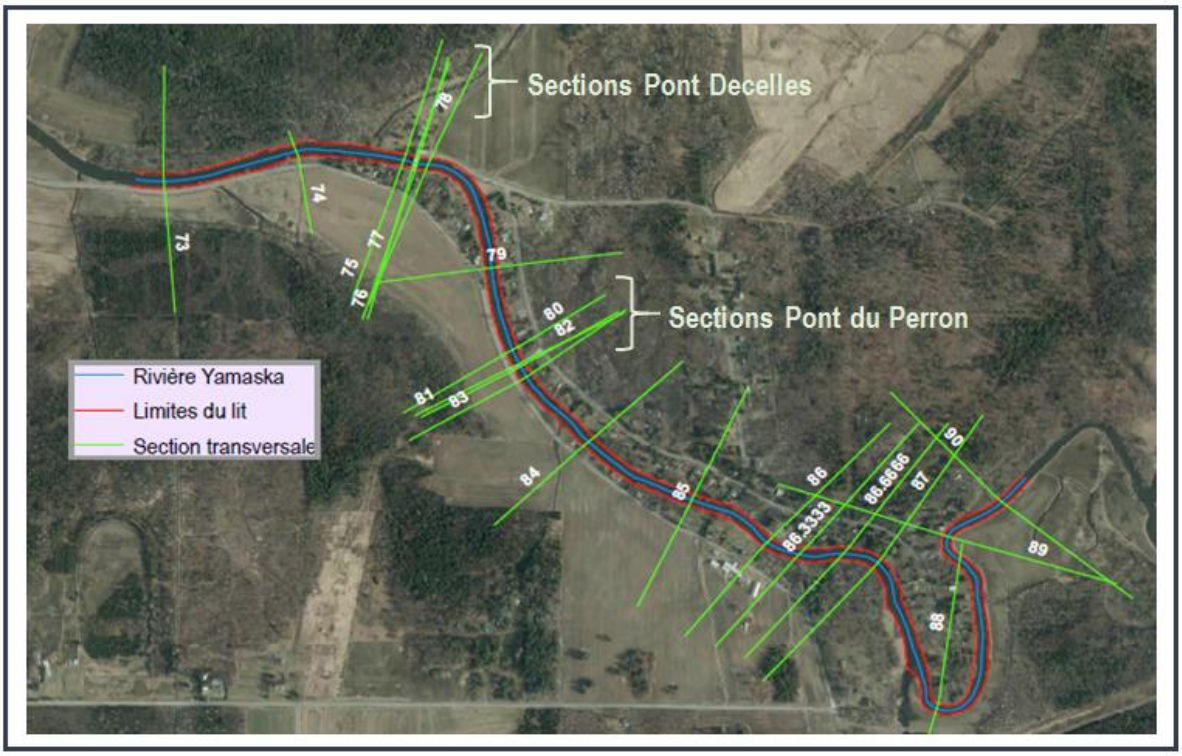


Figure 7 : Position des sections transversales établies par le CEHQ pour la modélisation du tronçon de la rivière Yamaska

À la différence des versions antérieures de HEC-RAS, la version 5.0 intègre une deuxième dimension au modèle permettant ainsi de mieux modéliser les plaines inondables. Des données complémentaires telles que la topographie, les surfaces d'écoulement, ou encore les cartes de rugosité sont utilisées permettant d'évaluer la perte d'énergie liée aux frottements non seulement dans le lit de la rivière, mais également sur les plaines inondables. Cette version de HEC-RAS permet la construction d'un maillage non-structuré, soit l'association de différentes tailles et formes de cellules afin de représenter au mieux la complexité du terrain et des éléments qui le composent (variation de pente, obstacles, etc.). Pour chaque cellule, les propriétés hydrauliques sont déterminées.

2.2.3 Données nécessaires pour la calibration du modèle

Le tableau 5 présente l'inventaire des données nécessaires pour la modélisation hydraulique 2D du tronçon étudié de la rivière Yamaska.

Tableau 5 : Liste des données nécessaires à la conception du modèle hydraulique 2D sous HEC RAS version 5.0

	DONNEES	FORMAT	Source
Couche Terrain (Plaines)	**Modèle numérique de terrain**	• *ESRI Grid Files,*	LiDAR
Couche Terrain (Lit de rivière)	**Bathymétrie**	• Format Tab	-
		• Format Tin	-
Géomorphologie	**Lit de la rivière**	• Shapefiles (.spf)	ESRI
	Tributaire	• Shapefiles (.spf)	
	Limites des rives	• Shapefiles (.spf)	
Structures hydrauliques	**Localisation**	• GPS	-
	Dimensions	• Format Tab	-
Couche Rugosité (Plaines)	**Photo aérienne**	• Image (.jpg)	Google Earth
	Contour des substrats	• Shapefiles (.spf)	ESRI
Couche Rugosité (Lit)	**Échantillons de substrat**	• Format Tab	-
Calage du modèle	**Débit et profondeur**	• Format Tab (.txt, .xls)	-

Afin de récolter les données dont dépend la calibration du modèle hydraulique, une campagne de terrain a été menée à l'automne 2016. Ainsi, des données géométriques destinées à représenter la géométrie de la rivière (lit principal, limite des berges, pente etc.) et des mesures de données hydrauliques ont été collectées :

- Bathymétrie;
- Localisation et dimensions des structures hydrauliques;
- Débit;
- Hauteur d'eau;
- Substrat.

L'ensemble des données a été récolté le long de coupes transversales réparties sur toute la longueur du tronçon d'étude. Le choix des positions a été préalablement défini. En supposant qu'il n'y a pas eu de variation morphologique du tronçon de rivière depuis l'année 2000 (année des relevés d'arpentage par le CEHQ pour ce même tronçon de

rivière), les coordonnées des sections transversales choisies par le CEHQ (ANNEXE 1) ont été conservées. L'intérêt est de pouvoir comparer les résultats obtenus entre la modélisation 1D du CEHQ et notre modèle 2D.

Des mesures bathymétriques entre la section 86.33 et 86.66 ont été ajoutées à notre campagne, contrairement au CEHQ qui a obtenu ces données par interpolation. Ceci vise à ajouter de l'information aux endroits où il y avait des lacunes dans le précédant modèle. Seize transects bathymétriques au total ont été réalisés durant la campagne de terrain effectuée en automne 2016. La figure 8 présente en vert les sections réalisées durant la campagne et en rouge, celles réalisées par le CEHQ en 2000.

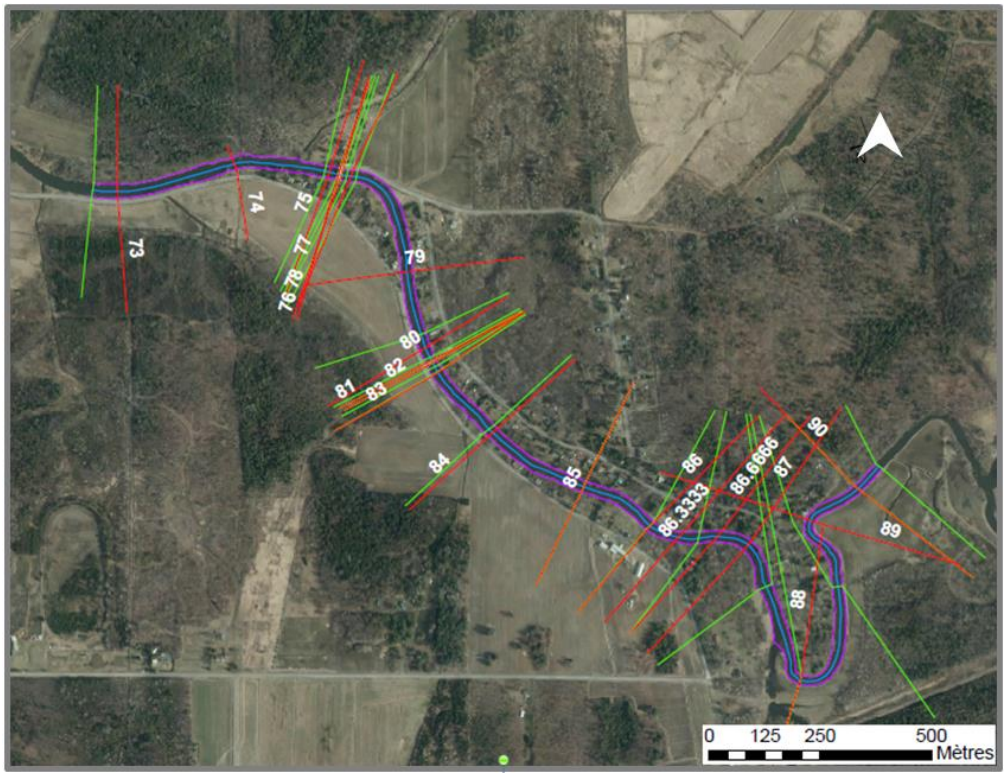


Figure 8 : Localisation des sections transversales. Tronçon de la rivière Yamaska. Secteur Brigham (en vert, sections réalisées par l'équipe de l'INRS et en rouge, sections réalisées par le CEHQ en 2000)

La calibration du modèle nécessite des mesures de débits et de hauteurs d'eau effectuées à différentes périodes de l'année. Une première campagne de mesures a donc été effectuée en période de faibles débits pour la calibration (30 septembre 2016) et une seconde lors de débits plus forts (hors période d'étiage) pour la validation du modèle (28 octobre 2016).

Pour chaque section transversale, des données de profondeur d'eau et de débit ont été récoltées à l'aide d'un profileur de courant à effet Doppler ADCP SonTek S5 (voir photographie en figure 9).

La figure 10 présente trois exemples de profils bathymétriques parmi les 64 mesurés sur le terrain. Chacun des profils a par la suite été combiné aux données de topographie des plaines extraites du MNT afin de compléter les données que le LiDAR ne permet pas d'obtenir. En effet, du fait de l'absorbtion des rayons infra-rouges (IR) par l'eau, le LiDAR ne permet pas d'obtenir les données du fond du lit de la rivière.

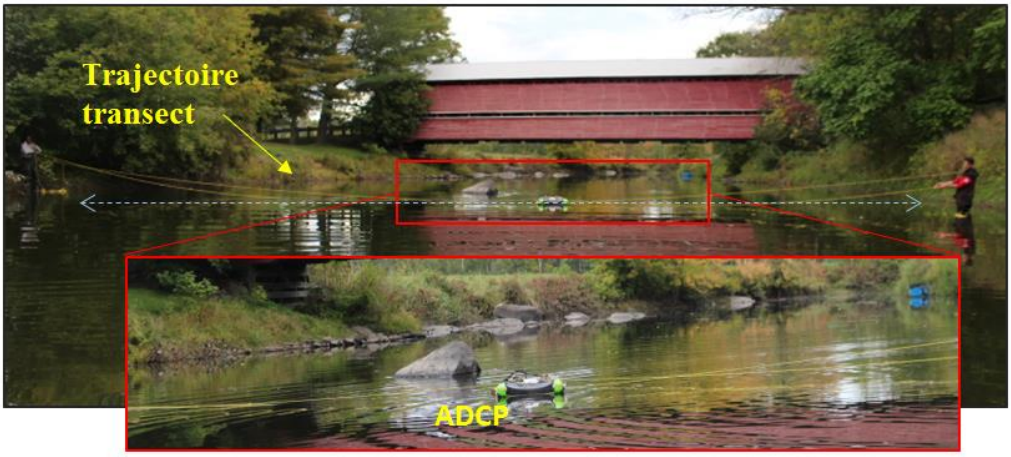


Figure 9 : Mesure bathymétrique le long d'une section transversale de la rivière Yamaska (secteur Brigham, pont du Decelles)

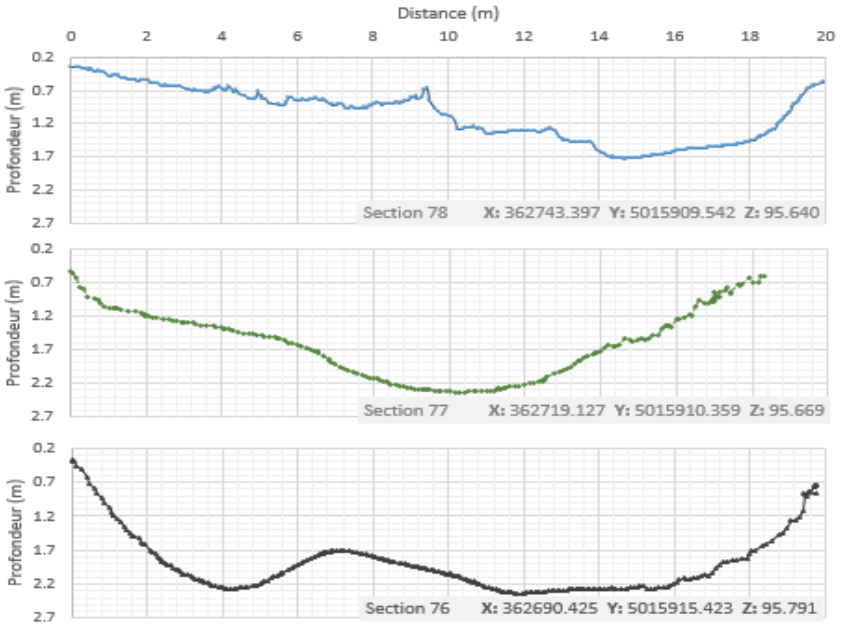


Figure 10 : Section transversales 78, 77 et 76 de la rivière Yamaska (secteur

2.2.4 Calibration du modèle hydraulique 2D

2.2.4.1 Modélisation de la couche terrain

La couche terrain est un élément essentiel pour la calibration du modèle hydraulique 2D. Elle permet à la fois de définir la géométrie du système ainsi que les propriétés hydrauliques du secteur étudié. Les données de terrain utilisées ont été extraites du modèle numérique de terrain (MNT) issu de données LiDAR (résolution de 1m).

Afin de construire la couche terrain, un premier modèle 1D a été réalisé afin de modéliser le lit de la rivière et créer la couche terrain du lit nécessaire pour définir ces variations morphologiques non disponible dans le MNT. La construction de cette couche terrain du lit a nécessité les données suivantes :

- l'axe central de la rivière et les lignes de rives;
- les sections transversales.

La suite de la procédure consiste à interpoler les sections transversales. Connaissant les limites des rives, la couche terrain du lit seul est ensuite combinée à la couche terrain initiale. Cette couche est finalement modifiée en intégrant les bâtiments dans le terrain.

2.2.4.2 Modélisation de couche de couverture des sols

La couche de couverture des sols (voir figure 11) permet de définir les contraintes de l'écoulement liées à la rugosité des sols. Ce paramètre varie selon la nature du substrat. Cette couche a été produite à l'aide de deux fichiers de données. Le premier décrit les différents types de couverture des sols couvrant la zone d'étude selon la classification de l'Observatoire de la terre au service du développement durable des forêts (OTDD). Le deuxième décrit les limites des différents types d'occupation des sols. Un tableau descriptif des différents substrats identifiés sur la zone d'étude est présenté dans l'annexe 2. Pour chacun des polygones, un coefficient de Manning a été affecté en fonction du type de substrat rencontré. Dans les plaines, les valeurs de coefficient de Manning varient entre 0.016 et 0.25 et entre 0.02 et 0.07 dans le lit. Chaque coefficient de Manning a été déterminé à l'aide de la classification des coefficients de Manning (n) de Chow (1959). La figure 12 présente quelques exemples de types de couverture végétale représentatifs des berges de la rivière Yamaska au niveau du secteur à l'étude.

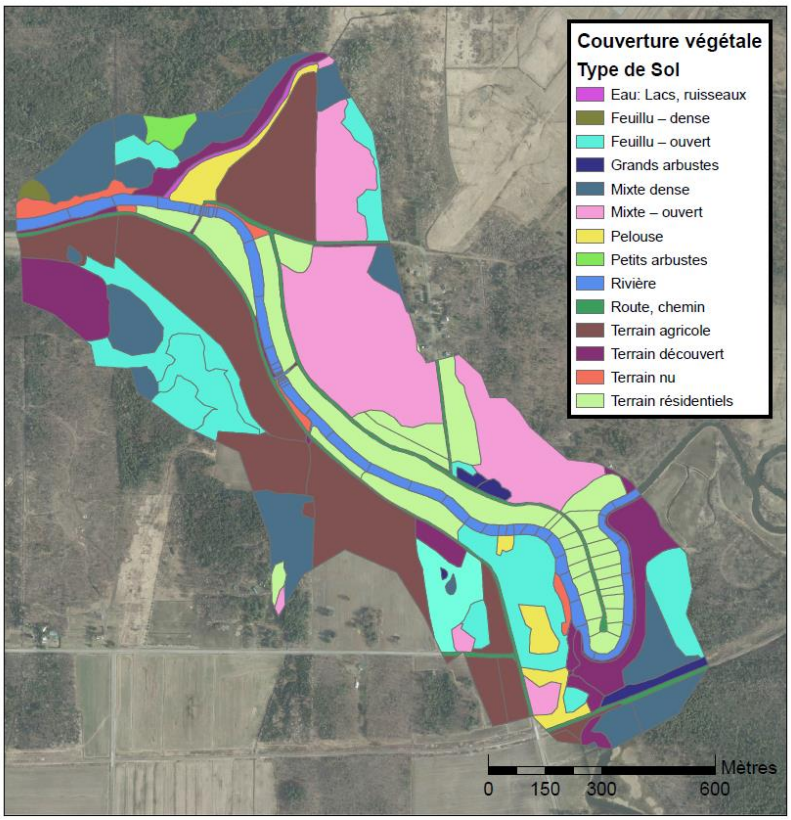


Figure 11 : Carte d'occupation du sol

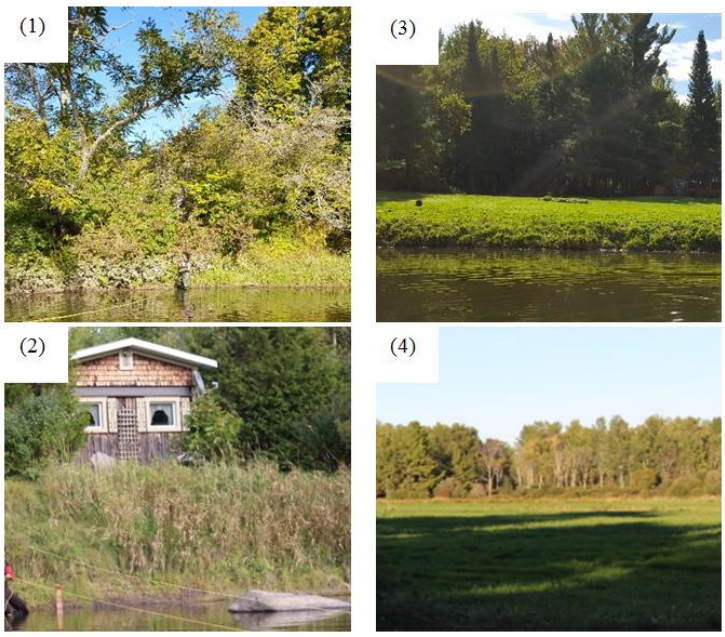


Figure 12: Variabilité du coefficient de Manning (1) n : 0,08 ; arbre, végétation haute épaisse, mauvaises herbes (2) n : 0,045 végétation haute et épaisse (3) n : 0,03 végétation basse (4) n : 0,03 terre non cultivée, végétation basse

2.2.4.3 Définition du réseau de maillage

La taille de la maille est basée sur le niveau de précision des données du terrain dont la résolution est égale à 1m, ainsi une maille de trois pieds (0,92m) était initialement prévu pour le modèle. Toutefois, un tel maillage (trop fin) a induit un temps de calcul trop long. Le terrain étant peu complexe et la pente étant faible, la taille de la maille a été augmentée à 4 pieds (1,22m) (voir figure ci-dessous).

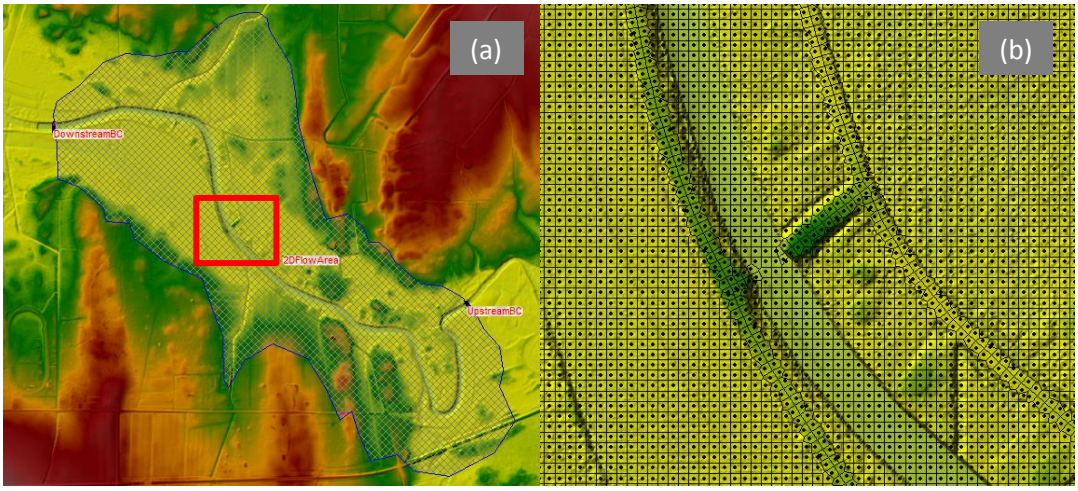


Figure 13 : Réseau de maillage 2D du secteur Choinière-Decelles-Fortin a la maille définie pour toute la zone à l'étude, b- un zoom pour la partie en rouge

2.2.4.4 Conditions aux limites et conditions initiales

Deux types de conditions aux limites ont été définis :

- **Mode Hydrograph** est défini en amont de la zone d'étude. Il représente les débits observés en entrée de la zone d'étude. Pour cela, un hydrogramme en amont du système a été intégré. Afin de simuler un « *régime permanent* », des hydrogrammes constants ont été intégrés pour chaque débit mesuré sur le terrain, soit, 0.78 et 15.3m^3/s pour la calibration du modèle. Un hydrogramme fictif à débit croissant simulant un débordement passant par tous les scénarios de crues de récurrence a été créé pour la simulation.

  Dans ce mode, un autre paramètre important doit être spécifié, soit la pente (nommée *slope energy*) qui est définie en entrée du système afin de déterminer comment est distribué le débit aux limites du secteur. Pour le modèle, une pente de 0.00003 m/m a été considérée.
- **Mode Normal depth** est défini en aval mais également aux limites du modèle. Dans ce mode, les limites sont considérées comme étant des frontières ouvertes.

De ce fait, le modèle suppose que l'eau a atteint une frontière, mais considère que l'eau continue de s'écouler en dehors des limites du modèle. Ce mode est défini par la pente de la surface de l'eau soit 0.00003 m/m.

Le modèle a également besoin d'être renseigné sur les conditions initiales du système. Pour cela, une hauteur d'eau représentative des conditions rencontrées à l'état stable (95,8m) a été spécifiée.

2.2.4.5 Calibration et validation du modèle

Les débits en amont et les hauteurs d'eau mesurées le long des sections transversales durant les campagnes de terrain ont été utilisées pour la calibration du modèle. Seulement, ces données ont permis la calibration du modèle pour de faibles débits (0.78 m^3/s et 15.3 m^3/s). Néanmoins, le CEHQ a mesuré des hauteurs d'eau pour une plus grande gamme de débits correspondants (4 à 56.8 m^3/s). Ces données ont donc été utilisées pour la calibration et la validation des hauteurs d'eau simulées par le modèle.

Les coefficients de Manning ont servi de paramètre d'ajustement du modèle dans le but de corriger les hauteurs d'eau simulées. Le tableau 6 présente les résultats obtenus durant la phase de calibration. Celui-ci donne une comparaison des hauteurs d'eau simulées et mesurées sur le terrain pour les différentes valeurs de débit. Une différence maximale de 10cm est tolérée et au-delà de laquelle on considère que le modèle n'est pas valide.

Tableau 6 : Comparaison des hauteurs d'eau mesurées et simulées par le modèle 2D du tronçon étudié de la rivière Yamaska

Section	Date	Débit (m^3/s)	El. Mesurée (m)	El. Simulée (m)	ΔEl (m)
90	10 - nov. - 00	4	96.22	96.24	-0.02
	10 - avr. - 01	37.8	98.04	98.01	0.03
	12 - avr. - 01	50.8	98.28	98.24	0.04
	13 - avr. - 01	56.8	98.43	98.37	0.06
	02 - avr. - 02	21.6	97.44	97.4	0.04
	29 - sep. - 16	0.78	95.8	95.79	0.01
	26 - oct. - 16	15.3	96.803	96.806	-0.003
87	10 - nov. - 00	4	96.17	96.19	-0.02
	10 - avr. - 01	37.8	97.95	97.95	0
	12 - avr. - 01	50.8	98.2	98.19	0.01
	13 - avr. - 01	56.8	98.36	98.31	0.05
	02 - avr. - 02	21.6	97.29	97.33	-0.04
	29 - sep. - 16	0.78	95.7	95.65	0.05
	26 - oct. - 16	15.3	96.695	96.63	0.065
75	10 - nov. - 00	4	96.02	96.03	-0.01
	10 - avr. - 01	37.8	97.46	97.5	-0.04
	12 - avr. - 01	50.8	97.53	97.59	-0.06
	13 - avr. - 01	56.8	97.69	97.74	-0.05
	02 - avr. - 02	21.6	96.76	96.82	-0.06
	29 - sep. - 16	0.78	-	95.35	-
	26 - oct. - 16	15.3	96.44	96.43	0.01

2.2.5 Production de résultats cartographiques

Dans cette section, les résultats obtenus par le modèle pour différents scénarios de crues seront présentés, soient pour des crues de récurrences 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

2.2.5.1 Cartographie des profondeurs

Les débits de crues de récurrences 2, 5 10, 20, 50 et 100 ont été simulés afin d'obtenir les cotes de crues correspondantes. Les résultats ainsi obtenus permettent de générer des cartes de niveau d'eau qui délimitent les zones inondables pour chaque période de retour.

À l'aide des cartes de niveau d'eau, une relation débit-niveau pour chaque résidence de la zone d'étude a été établie en se basant sur une méthode de régression. Une fonction

polynomiale de quatrième ordre qui décrit cette relation a été ainsi établie (voir exemple ci-dessous).

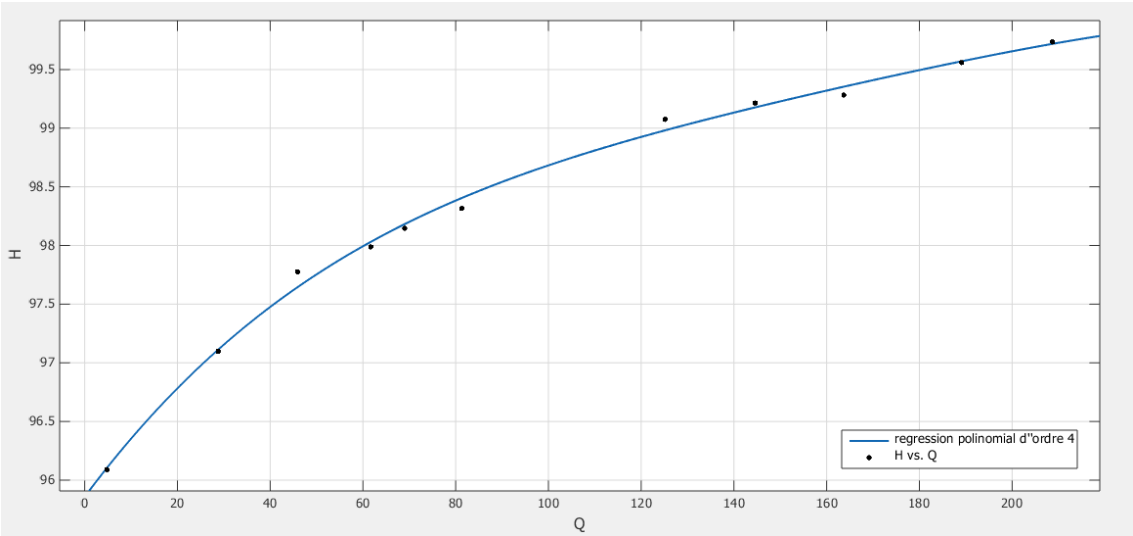


Figure 14 : Exemple d'une courbe débit-niveau issue d'une régression polynomiale d'ordre 4.

Les cartes des profondeurs issues des cartes de niveau d'eau présentent les variations de hauteurs d'eau par rapport au sol. Ces cartes permettent de définir les limites des zones inondables et par la même, d'identifier les résidences qui seront potentiellement affectées par une inondation. Elles permettent par exemple d'informer sur l'exposition des résidences à cet aléa. Cette information est primordiale pour le calcul des dommages. Les cartes de profondeur d'eau pour les récurrences 2, 20 et 100 ans sont présentées dans les figures ci-dessous (les cartes correspondantes à toutes les récurrences sont présentées à l'annexe 5).

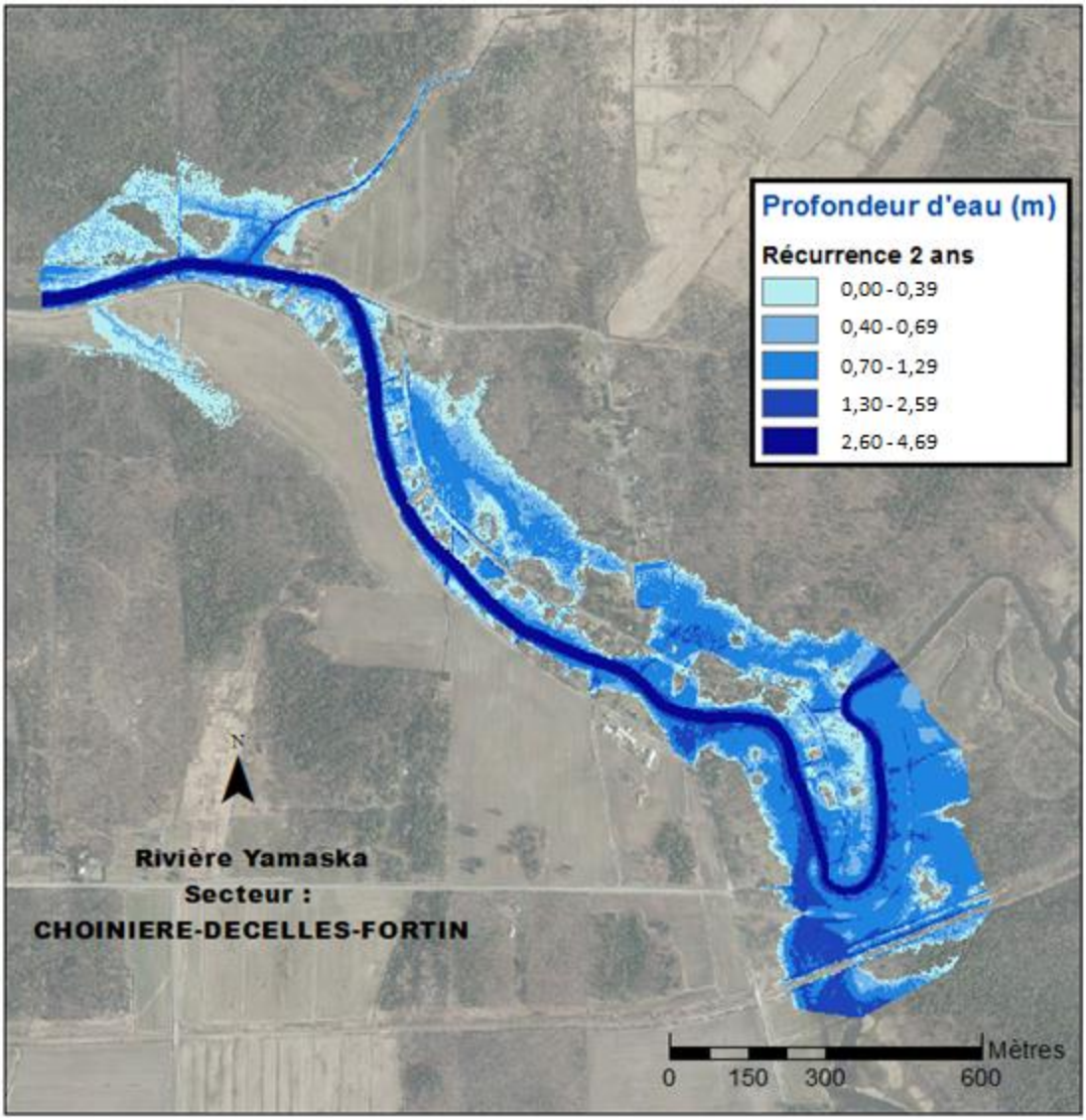


Figure 15 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 2 ans.

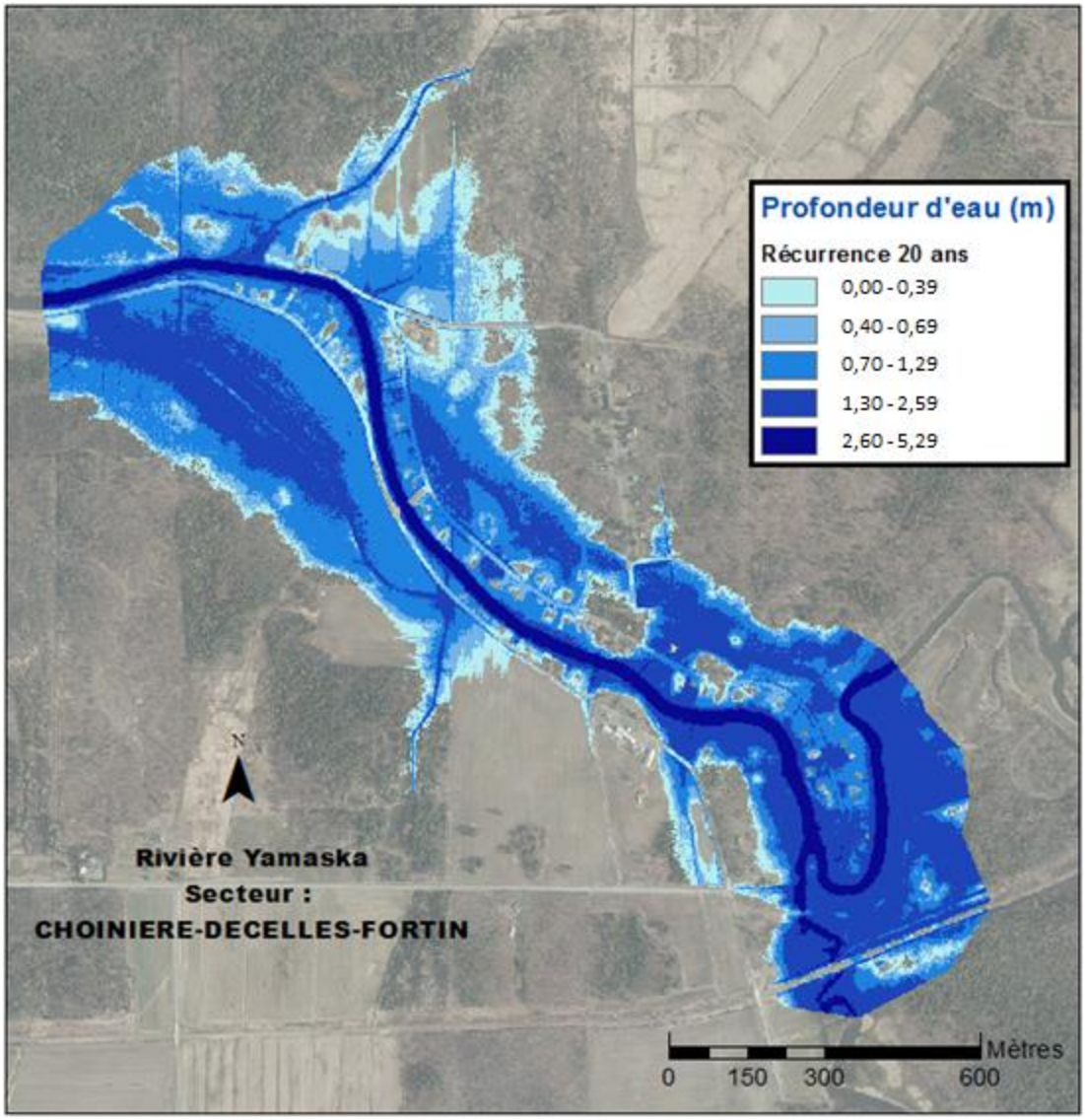


Figure 16 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 20 ans.

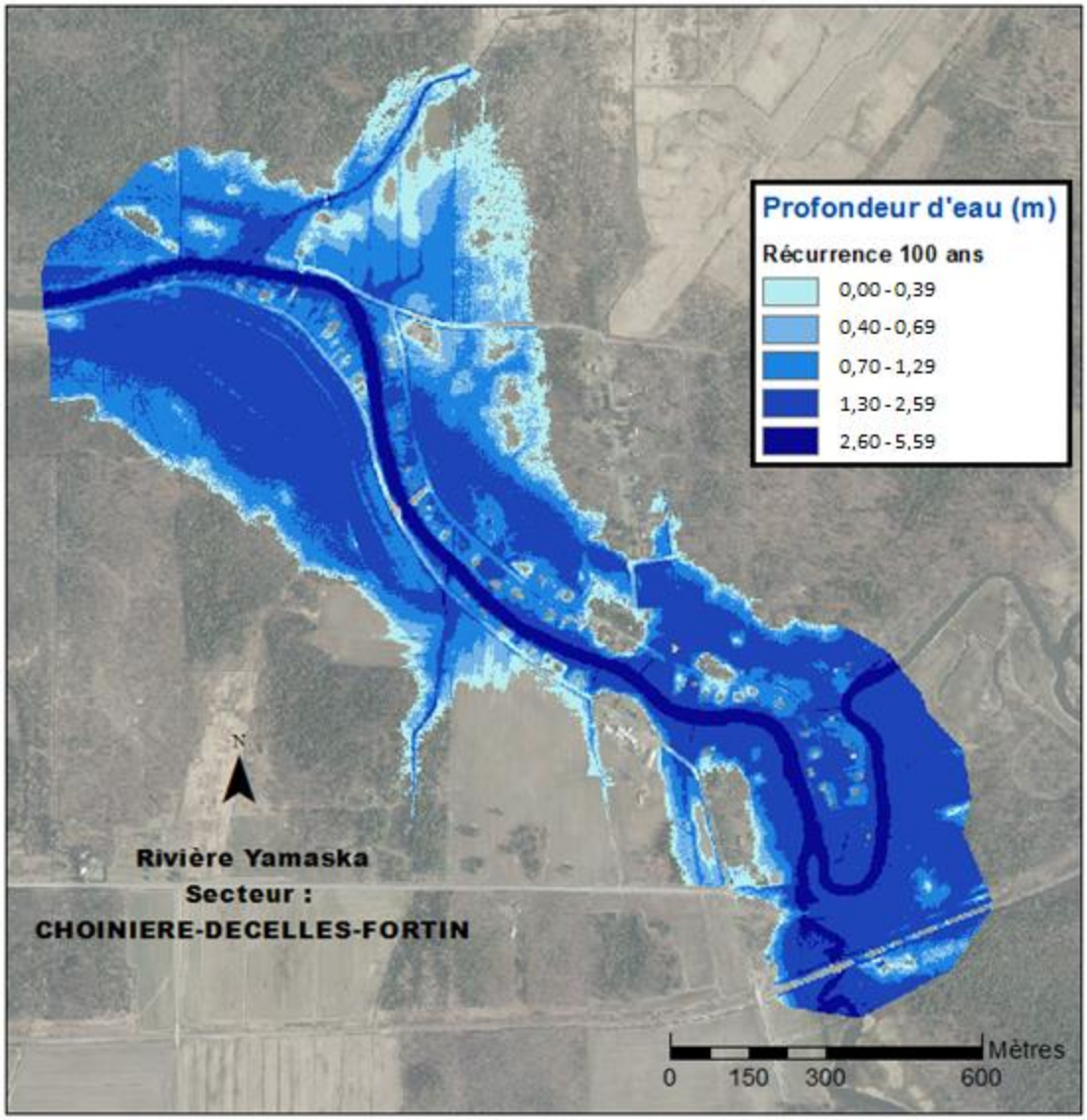


Figure 17 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 100 ans.

2.2.5.2 Cartographie des vitesses d'écoulement

Les cartes de vitesse permettent d'identifier les secteurs à risque pour les habitants. En plus de la profondeur d'eau, cette information est nécessaire pour évaluer le risque lié à la sécurité de la population lors d'une inondation. Les cartes de vitesse pour les récurrences 2, 20 et 100 ans sont présentées ci-dessous (figures 18 à 20). Les cartes correspondantes à toutes les récurrences sont présentées à l'annexe 6. Les plus grandes vitesses sont enregistrées dans le lit de la rivière (particulièrement dans les zones les plus profondes), les routes (rugosité très faible) ou sur les plaines dans les secteurs pouvant présenter des dépressions telles que les terrains agricoles.

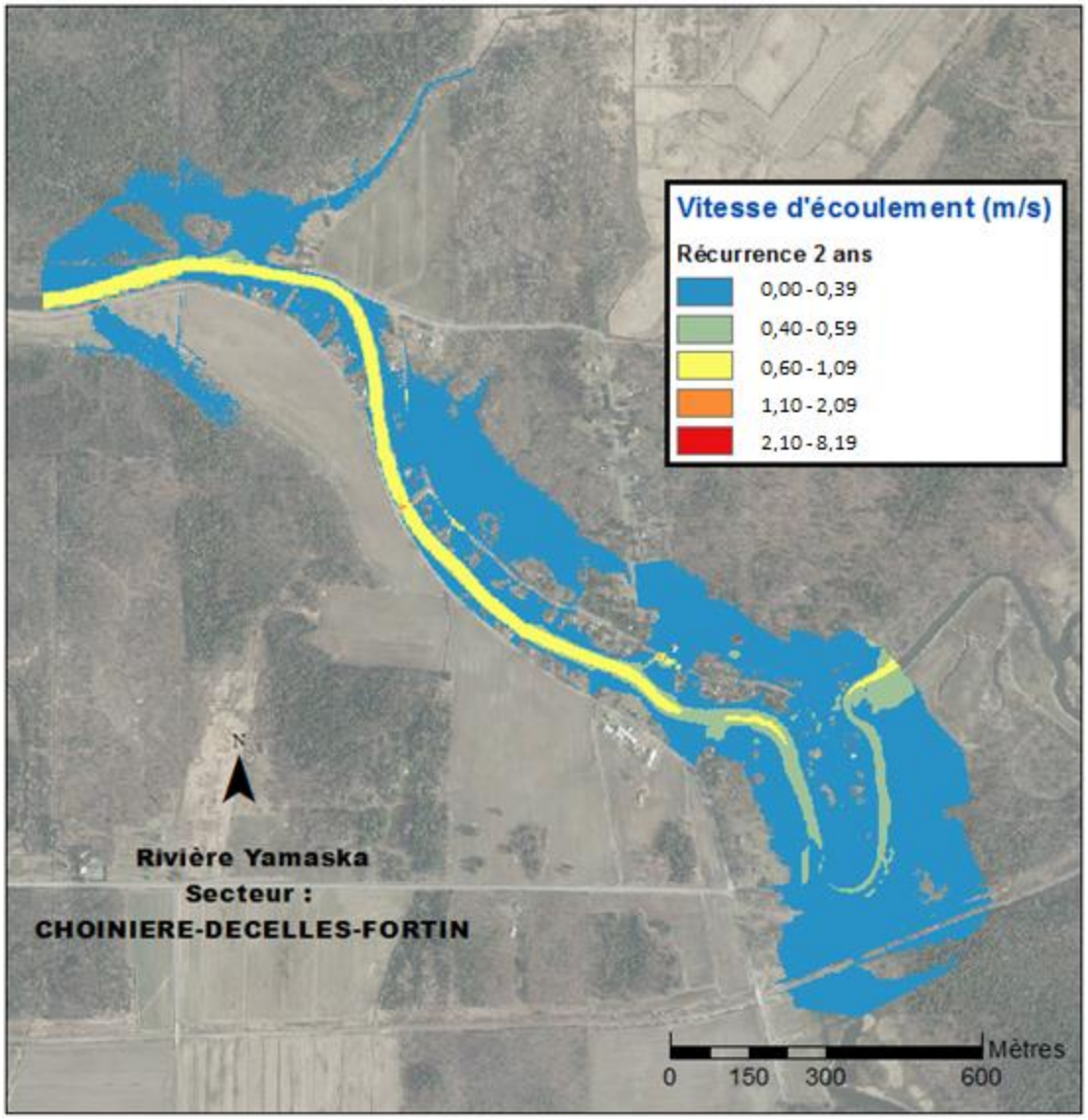


Figure 18 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 2 ans

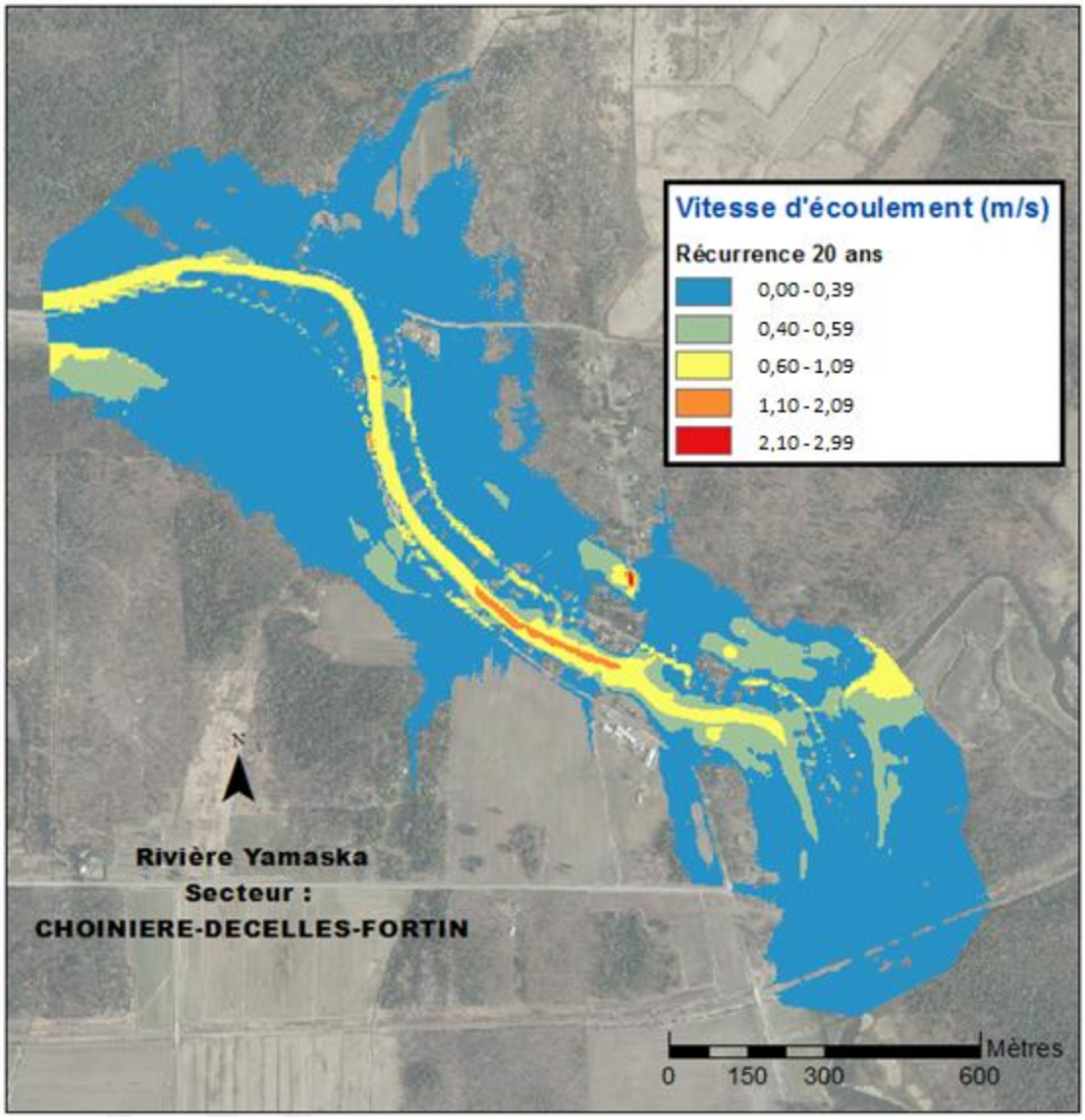


Figure 19 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 20 ans

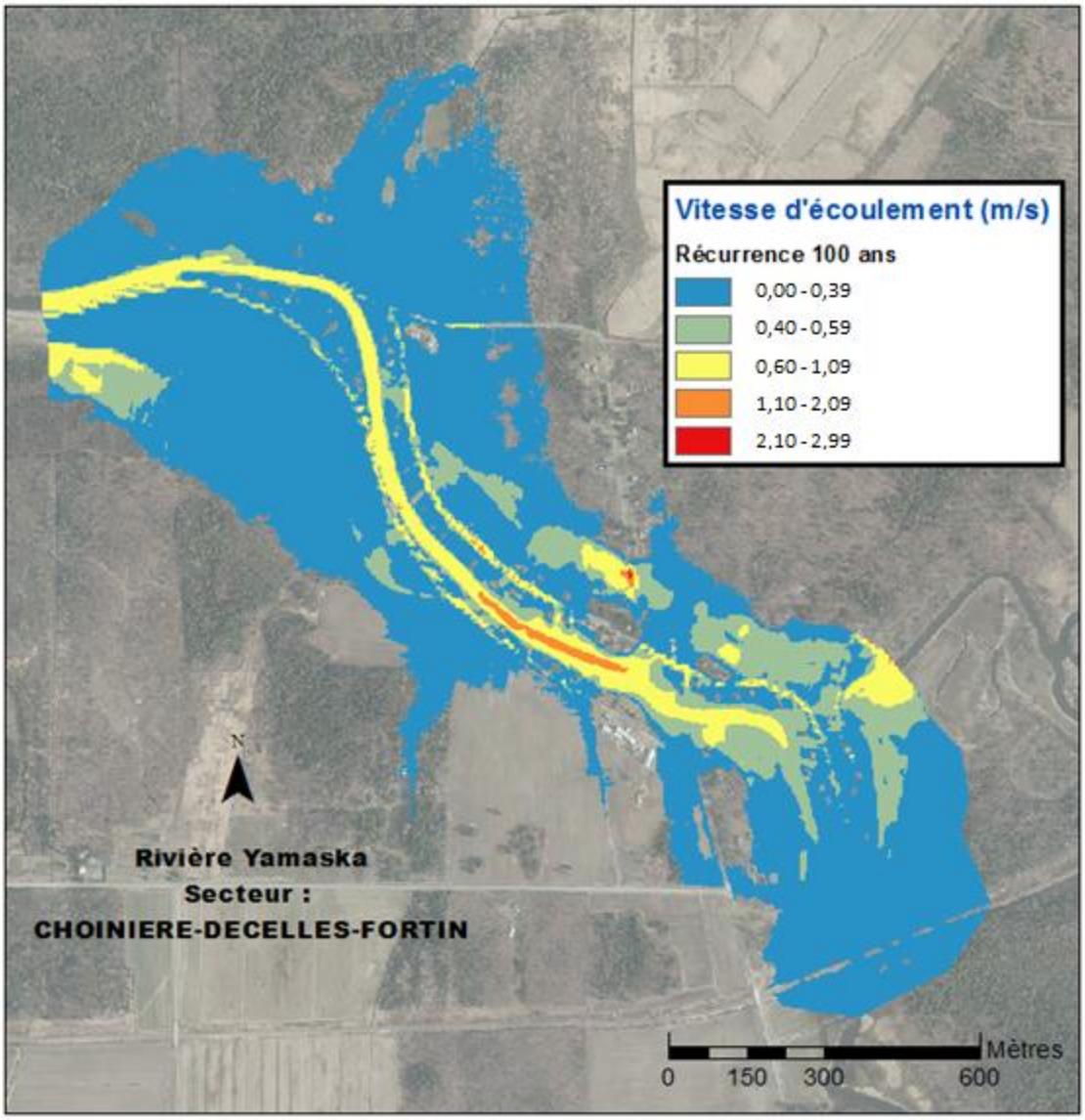


Figure 20 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 100 ans

2.3 Étude du dommage

Cette étape vise à établir des courbes de dommage (appelées encore courbe de dommage – submersion) à l'aide d'une fonction mathématique qui permet de modéliser empiriquement, pour un type de bâtiment, une relation entre la hauteur de submersion et les dommages subis. La hauteur de submersion dépend du niveau d'eau absolu, de l'élévation du terrain ainsi que de l'élévation du bâtiment par rapport au terrain. Elle est exprimée en mètre et a pour niveau de référence la cote du plancher principal de la résidence (le rez-de-chaussée) (voir figure 21). Les dommages peuvent être exprimés en

coût monétaire ou en taux d'endommagement (rapport entre le montant des dommages et la valeur du bâtiment) (Bonnifait, 2005).

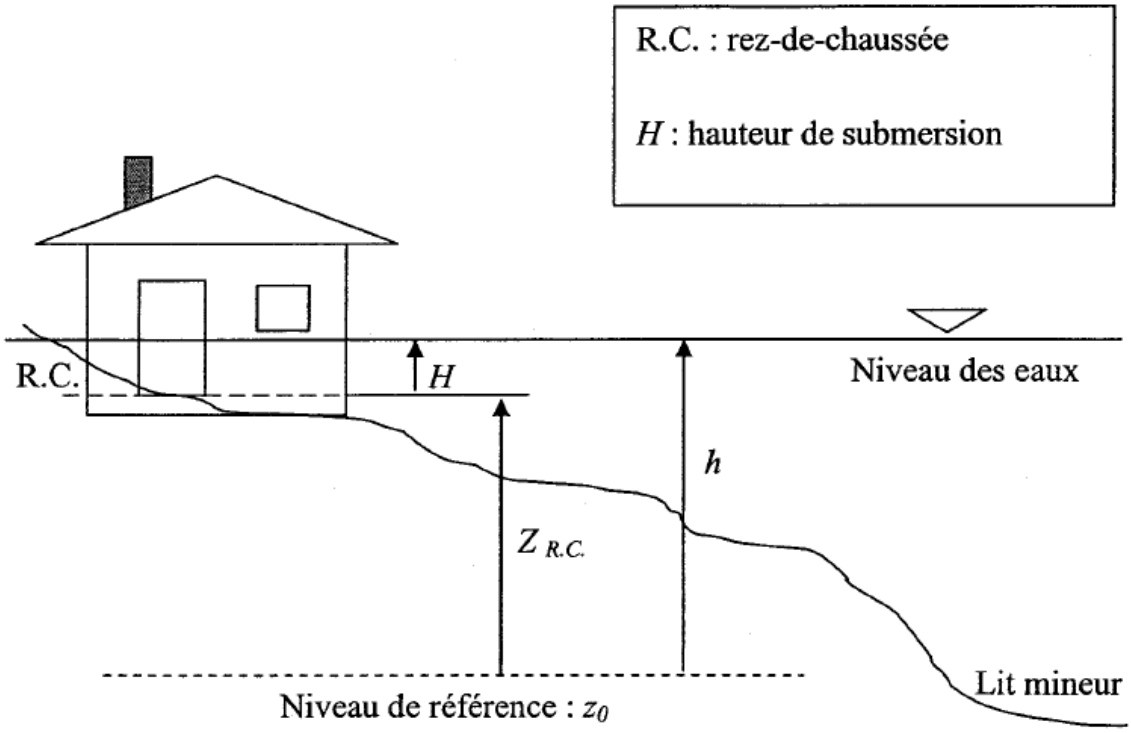


Figure 21 : Définition de la hauteur de submersion : $H = h - Z_{R.C.}$ (Bonnifait, 2005)

L'étude du dommage subi par les résidences commence par la sélection des typologies d'habitats présents dans le secteur d'étude. Pour ce faire, une base de données géospatiale sur l'inventaire des bâtiments a été utilisée. En plus de ces données, des informations recueillis lors d'une campagne de terrain au secteur étudié ont été exploités. Ainsi, six catégories de bâtiments ont été sélectionnées selon 3 critères (nombre d'étages, présence du sous-sol et type du sous-sol). Dans le présent travail, les courbes de dommage développées dans les travaux de Bonnifait (2005) ont été adoptées. Ce choix a été basé principalement sur le fait que celles-ci prennent en considération les caractéristiques de l'habitat québécois (typologie, matériaux de construction, système structural…). Trop peu de données historiques locales étaient disponibles pour développer des fonctions de dommage spécifiques au présent projet.

Les différentes catégories de bâtiments ainsi que les fonctions mathématiques qui définissent la courbe de dommage de chaque catégorie sont décrites dans les points qui suivent.

- **Résidences à un étage sans sous-sol**

Tableau 7: Fonction de dommage pour les résidences à un étage sans sous-sol

Domaine	$\boldsymbol{H < 0}$	$\boldsymbol{H \geq 0}$
Fonction	$D = 0.08\exp(1.3H)$	$D = \exp(-2.4\exp(-1.8H))$

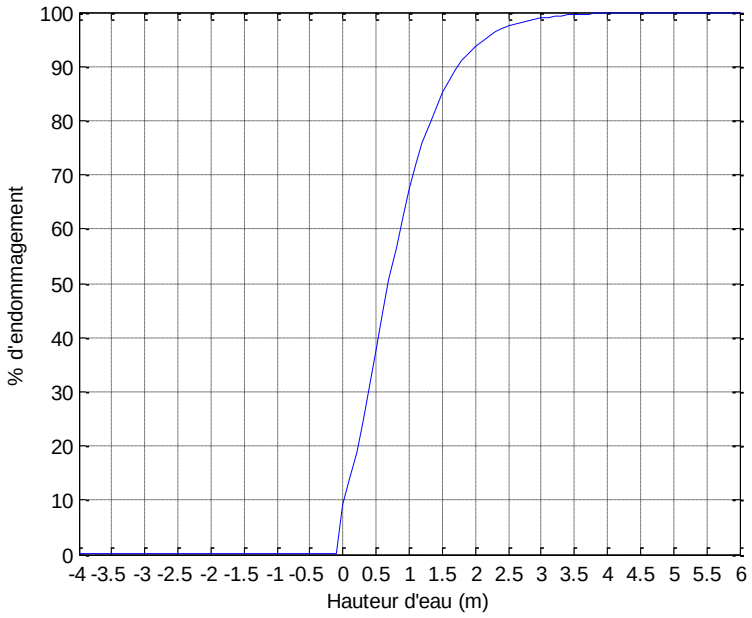


Figure 22 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage sans sous-sol

- **Un étage avec sous-sol fini**

Tableau 8: Fonction de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol fini

Domaine	$\boldsymbol{H < -0.4}$	$\boldsymbol{H \geq -0.4}$
Fonction	$D = 0.36\exp(-0.04\exp(-1.6H))$	$D = \exp(-0.7\exp(-1.1H))$

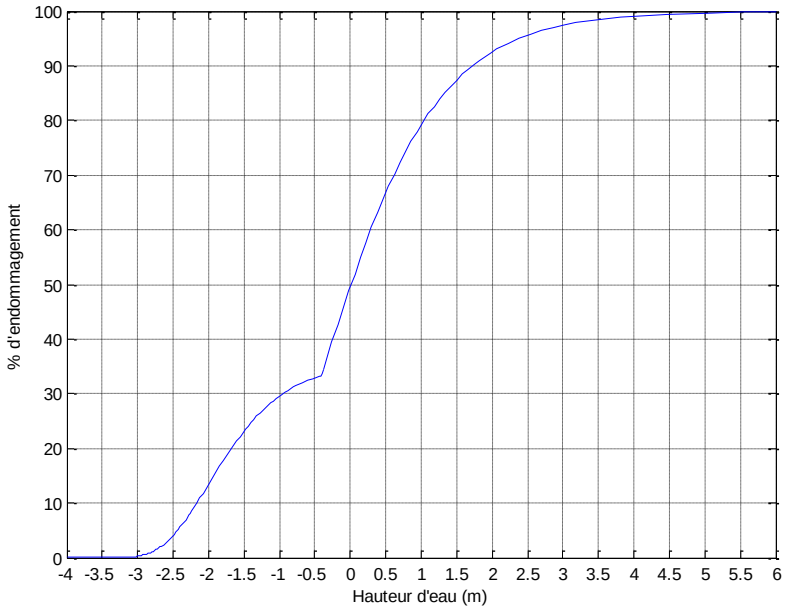


Figure 23 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol fini

- **Un étage avec sous-sol non fini**

Tableau 9: Fonction de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini

Domaine	$\boldsymbol{H < 0}$	$\boldsymbol{H \geq 0}$
Fonction	$D = 0.3\exp(1.7H)$	$D = \exp(-1.2\exp(-1.7H))$

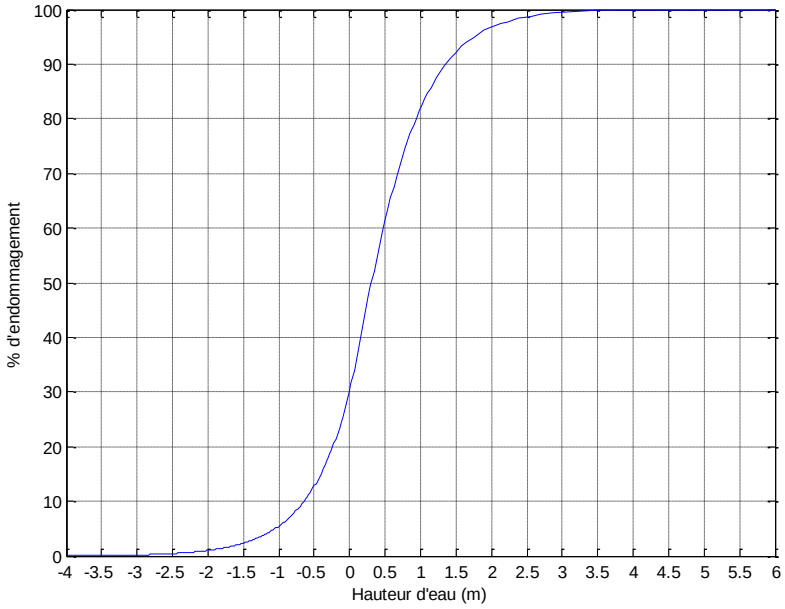


Figure 24 : Courbe de dommage pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini

- **Deux étages sans sous-sol**

Tableau 10: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages sans sous-sol

Domaine	$\boldsymbol{H < 0}$	$\boldsymbol{0 \leq H < 2.5}$	$\boldsymbol{H \geq 2.5}$
Fonction	$D = 0.06\exp(1.2H)$	$D = 0.82\exp(-2.5\exp(-1.9H))$	$D = \exp(-0.8\exp(-2.4(H-2)))$

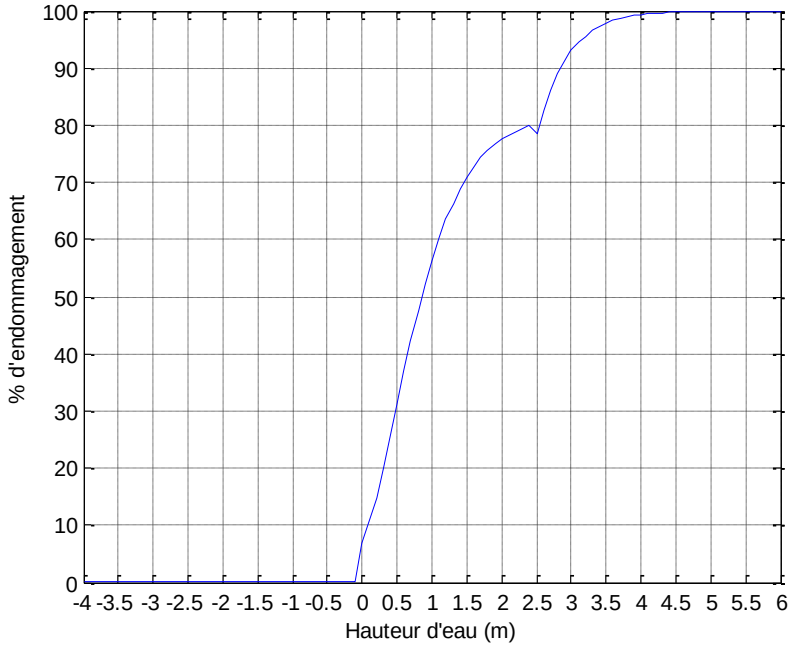


Figure 25 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages sans sous-sol

- **Deux étages avec sous-sol fini**

Tableau 11: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini

Domaine	$\boldsymbol{H < -0.4}$	$\boldsymbol{-0.4 \leq H < 2.5}$	$\boldsymbol{H \geq 2.5}$
Fonction	$D = 0.27\exp(-0.04\exp(-1.6H))$	$D = 0.81\exp(-0.7\exp(-1.3H))$	$D = \exp(-0.7\exp(-2.1(H-2)))$

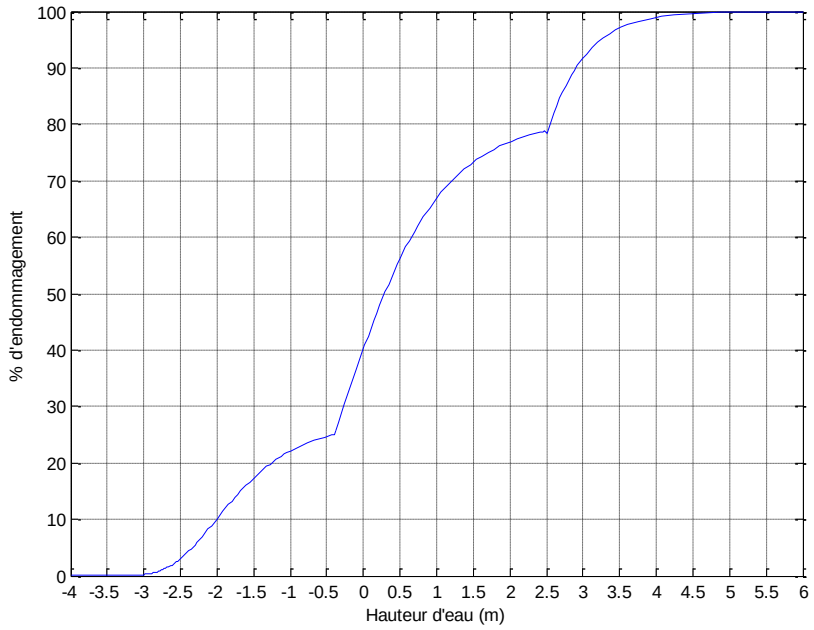


Figure 26 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini

- **Deux étages avec sous-sol non fini**

Tableau 12: Fonction de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini

Domaine	$\boldsymbol{H < -0.1}$	$\boldsymbol{-0.1 \leq H < 2.5}$	$\boldsymbol{H \geq 2.5}$
Fonction	$D = 0.15\exp(1.4H)$	$D = 0.82\exp(-1.5\exp(-1.5H))$	$D = \exp(-0.7\exp(-2.1(H-2)))$

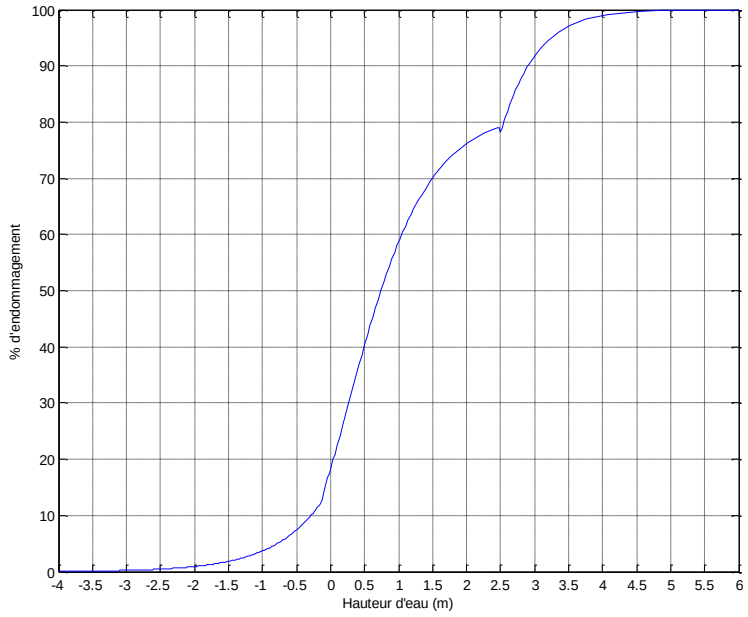


Figure 27 : Courbe de dommage pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini

Il est important de noter que dans le cas où le niveau de la rivière est supérieur à celui du plancher du sous-sol, mais que le niveau du terrain environnant le bâtiment est supérieur à celui de la rivière, le taux d'endommagement pris sera égal à 0 (zéro) : cela revient à dire qu'on considère qu'il n'y pas de rentrée d'eau dans le sous-sol par refoulement ou par la nappe phréatique connectée à la rivière.

2.4 Évaluation du dommage annuel moyen

Afin d'évaluer le dommage annuel moyen causé par les inondations, une approche de simulation Monte-Carlo (MC) a été utilisée. Cette approche s'articule sur les étapes suivantes (voir figures 28 et 29) :

- Échantillonner la courbe de relation débit-probabilité issue de l'étude hydrologique afin de générer un évènement de crue. Ceci revient à un tirage qui suit la loi de probabilité au dépassement. Ce tirage correspond à un débit déterminé à partir de la courbe débit-probabilité.
- Déterminer le niveau d'eau qui correspond au débit de crue à partir de la relation débit-niveau associé à chaque résidence du secteur d'étude.
- Évaluer le dommage correspondant à ce niveau d'eau à partir de la courbe de dommage correspondante selon la typologie du bâtiment.
- Répéter cette procédure un nombre de fois suffisamment grand (25 000 dans notre cas) pour que la distribution de dommage soit stable.
- Calculer la moyenne de cette distribution de dommage. Cet indicateur statistique représente la valeur du risque moyen annuel des inondations.

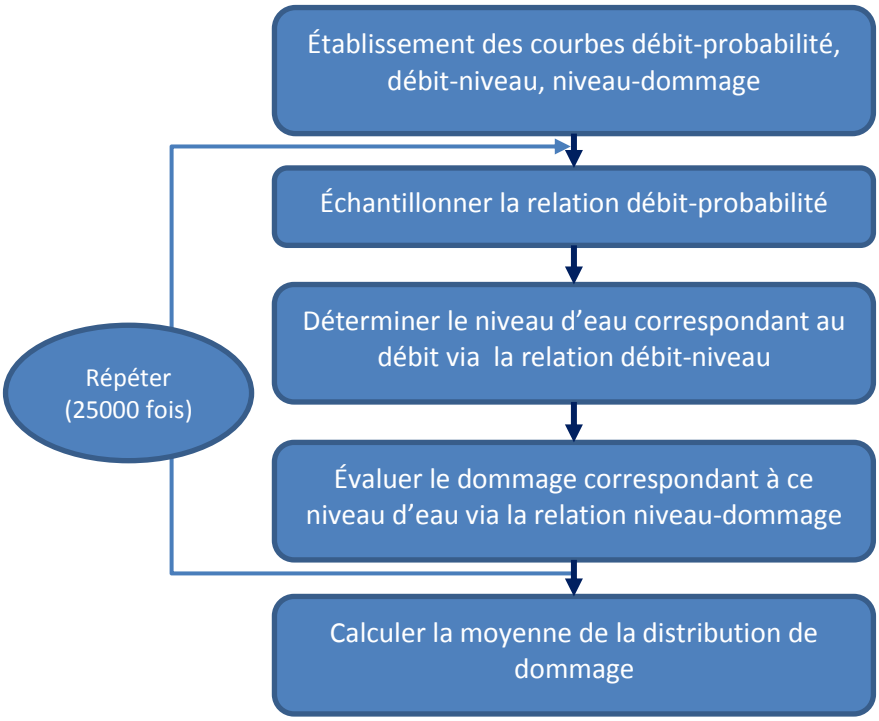


Figure 28 : Méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen d'inondation

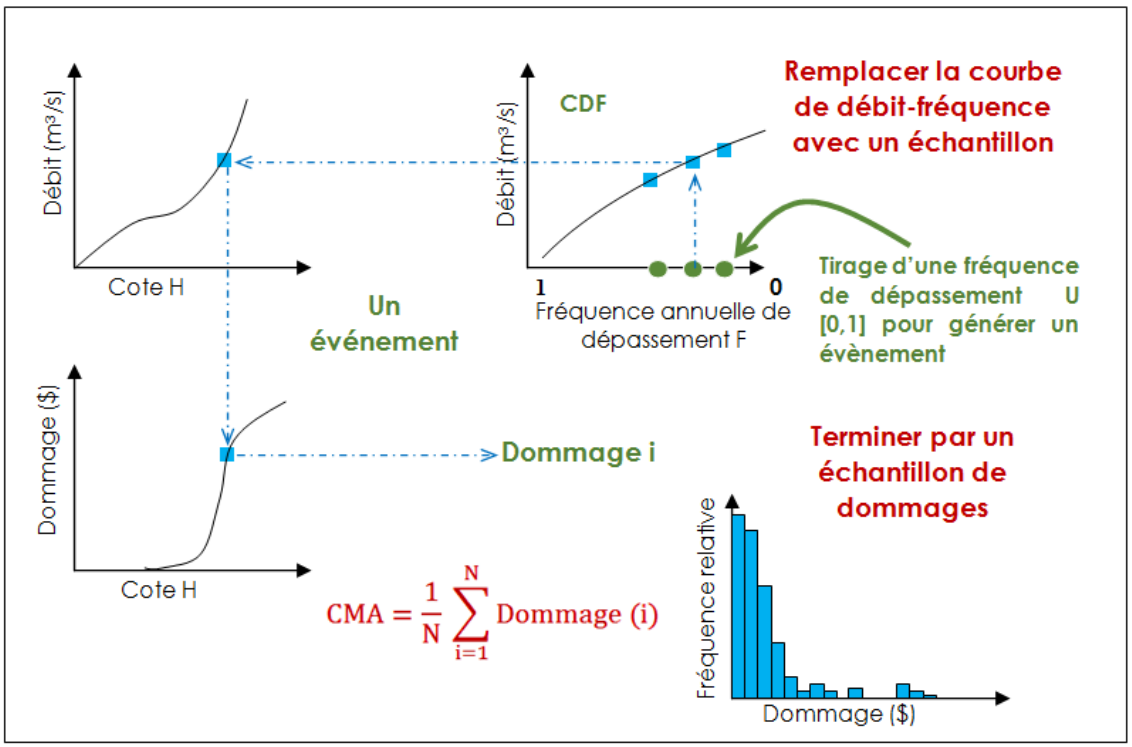


Figure 29 : Méthode de calcul du dommage annuel moyen d'inondations

3 Portrait financier du risque d'inondations

3.1 Portrait des inondations historiques récentes

3.1.1 Objectif

Ce volet du projet vise à identifier et caractériser les secteurs les plus touchés par les inondations en se basant sur les données historiques fournies par le MSP.

3.1.2 Méthodologie et analyse des données

Afin d'analyser les données d'indemnisation fournies par le ministère, la zone d'étude a été subdivisée en 3 secteurs principaux (voir figure ci-dessous):

- Le secteur Decelles : situé sur la rive droite de la rivière Yamaska
- Le secteur Choinière : situé sur la rive gauche de la rivière Yamaska
- Le secteur du méandre : regroupe les bâtiments situés dans le méandre

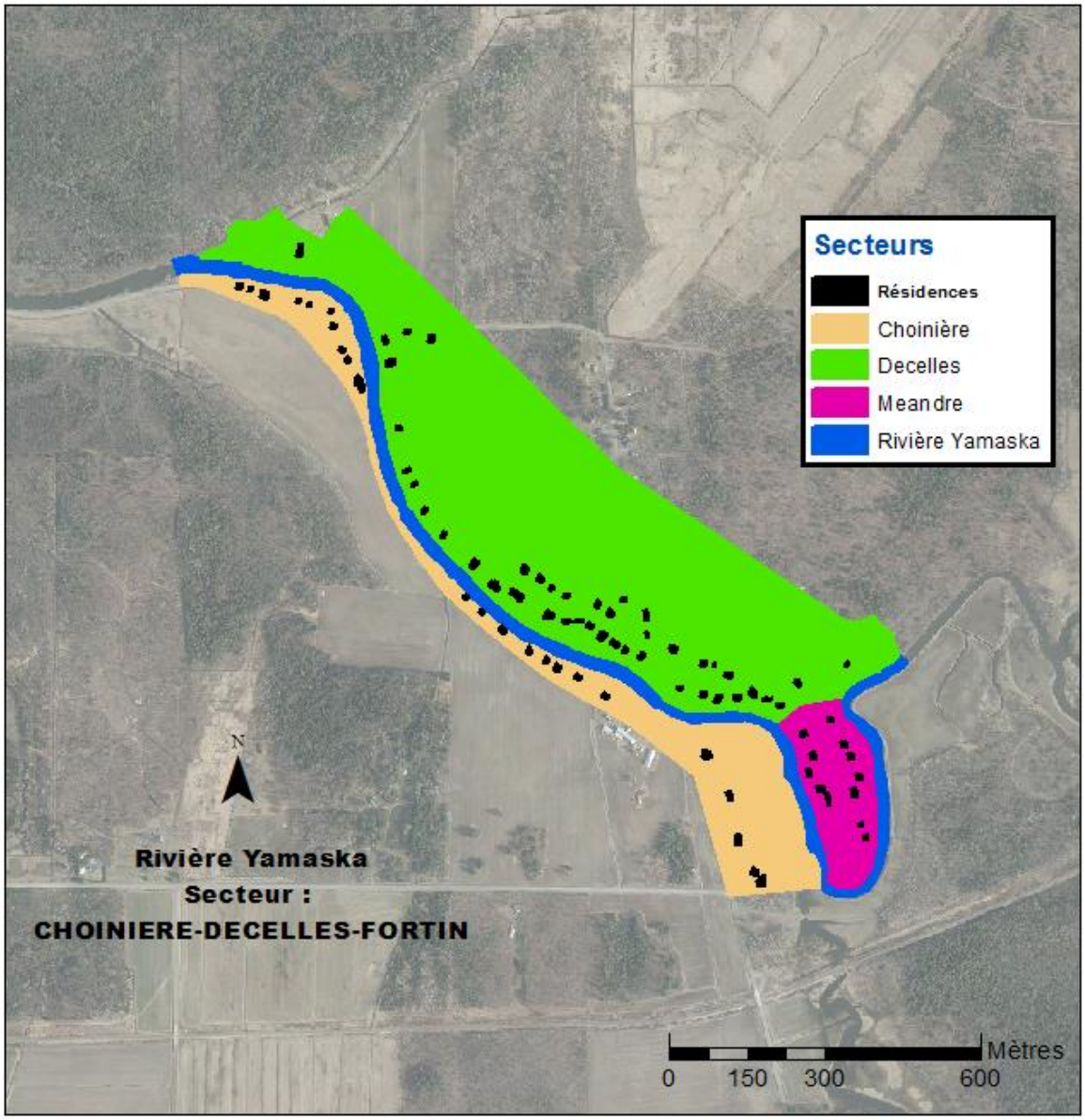


Figure 30: Subdivision de la zone à l'étude en trois secteurs

3.1.2.1 Analyse des données d'aide financière du MSP

Afin de dresser un portrait des inondations historiques d'un point de vue financier, nous nous sommes basés sur les données existantes au MSP relativement aux programmes d'aide financière en cas de sinistre depuis 1990.

La compilation de ces données a permis d'obtenir le tableau ci-dessous qui couvre une période qui s'étend de l'année 1996 jusqu'à 2016. La colonne « aide totale » correspond à l'aide accordée par le MSP pour les résidents et la municipalité. Une partie de cette valeur est dédiée à l'indemnisation des dommages qui touchent la structure de la résidence. Ce montant est représenté au tableau par la colonne « Aide pour biens

immeubles ». La colonne « participation » représente la contribution des résidents ou de la municipalité à assumer une partie des coûts relatifs aux dommages causés par l'inondation. Le « coût total » est la somme de l'aide du MSP avec la participation des résidents/municipalité.

Tableau 13 : Données d'aide financière du MSP

Événement	Adresse	Aide totale	Aide pour biens immeubles	Participation	Coût total
Janvier 96	6, rue Decelles	10 359 $	10 359 $	4 440 $	14 799 $
	Mun. de Brigham	12 799 $	0 $	11 436 $	24 236 $
2003-2004	Mun. de Brigham	11 975 $	0 $	10 907 $	22 882 $
20 mai 2006	11, rue Decelles	5 842 $	1 884 $	801 $	6 643 $
	8, chemin Choinière	794 $	0 $	0 $	794 $
	11, chemin Choinière	2 953 $	2 586 $	748 $	3 702 $
	Mun. de Brigham	10 222 $	0 $	10 463 $	20 685 $
11 juin 2006	Mun. de Brigham	9 518 $	0 $	10 229 $	19 747 $
avril-mai 2011	Mun. de Brigham	24 106 $	0 $	13 992 $	38 098 $
	10, rue Decelles	18 208 $	17 080 $	4 438 $	22 646 $
28-29 aout 2011	11, rue Decelles	14 577 $	10 823 $	2 706 $	17 283 $
	Mun. de Brigham	13 178 $	0 $	11 260 $	24 439 $
4-6sept 2011	Mun. de Brigham	1 017 $	0 $	5 600 $	6 616 $
29 mai 2012	Mun. de Brigham	1 056 $	0 $	5 721 $	6 776 $
Total		**136 604 $**	**42 732 $**	**92 741 $**	**229 346 $**

Les deux premiers évènements figurant dans le tableau précédent ont eu lieu dans des périodes hivernales, par contre, il n'y aucune information qui confirme qu'il s'agit des inondations à eau libre ou causés par des embâcles.

En considérant la contribution des résidents ainsi que de la municipalité, le coût total engendré par les inondations dans la zone à l'étude s'élève à environ 229 500 $ sur la période de 20 ans (1996-2016), sans tenir compte de l'inflation.

Considérons, en premier lieu, les montants d'indemnisation pour les biens immeubles (bâtiments) des résidents du secteur à l'étude. En se basant sur la figure 30 et le tableau 13, les dommages des biens immeubles peuvent être résumés par évènement dans le tableau ci-dessous. La nouvelle colonne « participation immeuble » a été obtenue en utilisant une simple règle de trois des valeurs des colonnes « aide totale », « aide pour biens immeubles » et « participation ».

$$\text{participation immeuble} = (\text{participation x aide pour biens immeubles})/\text{aide totale} \quad (4)$$

Tableau 14 : Données d'aide financière du MSP pour les résidents

Événement	Adresse	Aide totale	Aide pour biens immeubles	Participation	Participation immeuble	Dommage total immeuble	Secteur
Janvier 96	6, rue Decelles	10 359 $	10 359 $	4 440 $	4 440 $	14 799 $	Decelles
20 mai 2006	11, rue Decelles	5 842 $	1 884 $	801 $	258 $	2 142 $	Meandre
	8, chemin Choinière	794 $	0 $	0 $	0 $	0 $	Choinière
	11, chemin Choinière	2 953 $	2 586 $	748 $	655 $	3 241 $	Choinière
avril-mai 2011	10, rue Decelles	18 208 $	17 080 $	4 438 $	4 163 $	21 243 $	Meandre
28-29 aout 2011	11, rue Decelles	14 577 $	10 823 $	2 706 $	2 009 $	12 832 $	Meandre
Total		**52 733 $**	**42 732 $**	**13 133 $**	**11 525 $**	**54 257 $**	**-**

Les données d'aide financières pour les résidences peuvent également être regroupées par secteur comme le montre le tableau ci-dessous. À partir de ce dernier, on peut remarquer que les dommages sont beaucoup plus importants pour le secteur du méandre par rapport aux autres secteurs. Ce secteur a subi environ les deux tiers des dommages totaux par rapport à toute la zone à l'étude (voir figure 31).

Tableau 15 : Données d'aide financière du MSP pour résidences regroupées par secteur

Secteur	Aide totale	Aide pour biens immeubles	Participation	Participation immeuble	Dommage total immeuble	Dommage annuel immeuble	Pourcentage par secteur
Méandre	38 627 $	29 787 $	7 945 $	6 430 $	36 217 $	1810 $	67 %
Decelles	10 359 $	10 359 $	4 440 $	4 440 $	14 799 $	740 $	27 %
Choinière	3 747 $	2 586 $	748 $	655 $	3 241 $	162 $	6 %
Total	**52 733 $**	**42 732 $**	**13 133 $**	**11 525 $**	**54 257 $**	**2712 $**	**100 %**

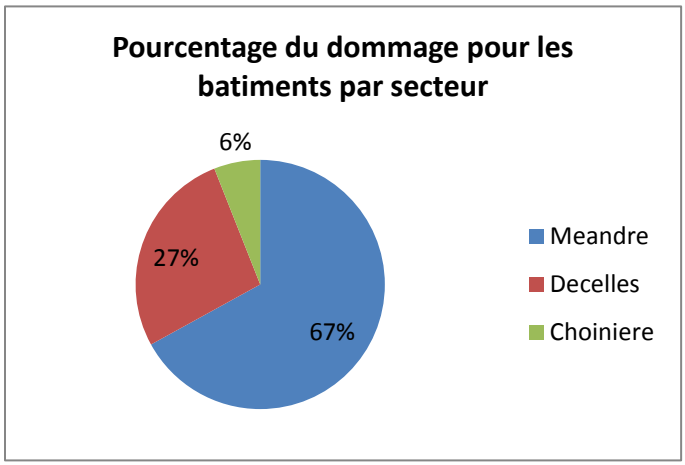


Figure 31 : Pourcentage du dommage pour les bâtiments par secteur

L'aide financière reçue par la municipalité de Brigham s'élève à environ 163 500 $ (voir tableau ci-dessous), sans tenir compte de l'inflation, ce qui représente 71% du coût total (229 500 $) engendré par les inondations sur la période de 20 ans.

Tableau 16 : Données d'aide financière du MSP pour la municipalité de Brigham

Événement	Aide totale	Participation	Coût total
Janvier 96	12 799 $	11 436 $	24 236 $
2003-2004	11 975 $	10 907 $	22 882 $
20 mai 2006	10 222 $	10 463 $	20 685 $
11 juin 2006	9 518 $	10 229 $	19 747 $
avril-mai 2011	24 106 $	13 992 $	38 098 $
28-29 aout 2011	13 178 $	11 260 $	24 439 $
4-6sept 2011	1 017 $	5 600 $	6 616 $
29 mai 2012	1 056 $	5 721 $	6 776 $
Total	**83 871 $**	**79 608 $**	**163 479 $**

3.1.2.2 Analyse des données issues du sondage auprès des citoyens

Au courant de l'année 2016, un sondage a été mené par la municipalité de Brigham auprès des résidents du secteur à l'étude (voir annexe 8). Des réponses au questionnaire ont été obtenues pour 31 adresses civiques résidentielles. Parmi les informations demandées par ce questionnaire, figure le dommage subi par des inondations historiques. Les évènements du 20 mai 2006, avril-mai 2011 et celui du 28-29 aout 2011 ont été les seuls à être cités. Le tableau ci-dessous résume les montants déclarés :

Tableau 17 : Données de dommage déclarées par les citoyens

Événement	Adresse	Montant estimé des dommages	Montant réclamé au MSP	Montant obtenu par le MSP	Type de résidence (date d'emménagement)	Secteur
20 mai 2006	24, rue Decelles	5 000 $	0 $	0 $	Secondaire (2015)	Decelles
	10, rue Decelles	600 $	0 $	0 $	Principale (1995)	Méandre
avril-mai 2011	10, rue Decelles	22 000 $	22 000 $	19 000 $	Principale (1995)	Méandre
28-29 aout 2011	2, rue Decelles	4 000 $	0 $	0 $	Principale (2010)	Decelles
	15, rue Decelles	46 300 $ (40000 $ à 52600 $)	0 $	0 $	Secondaire (2009)	Méandre
	6, chemin Choinière	500 $	0 $	0 $	Principale (2009)	Choinière
	25, rue Decelles	1 000 $	0 $	0 $	Secondaire (2008)	Decelles
	26, rue Decelles	5 000 $	0 $	0 $	Secondaire (N/A)	Méandre
Total		**84 400 $**	**22 000 $**	**19 000 $**		

Les données de dommages déclarés par les citoyens peuvent être regroupées par secteur (voir tableau ci-dessous). À partir de ce dernier on peut constater que les dommages sont

beaucoup plus importants pour le secteur du méandre par rapport aux autres secteurs. Ce secteur subit environ trois quarts des dommages totaux par rapport à toute la zone à l'étude.

Tableau 18 : Données de dommage déclarées par les citoyens regroupées par secteur

Secteur	Montant estimé des dommages	Montant réclamé au MSP	Montant obtenu par le MSP	Dommage annuel estimé	Pourcentage du montant estimé par secteur
Méandre	73 900 $	22 000 $	19 000 $	3695 $	87 %
Decelles	10 000 $	0 $	0 $	500 $	12 %
Choinière	500 $	0 $	0 $	25 $	1 %
Total	**84 400$**	**22 000 $**	**19 000 $**	**4220 $**	**100 %**

3.2 Évaluation du dommage annuel moyen

3.2.1 Objectif

Cette partie du projet s'intéresse à quantifier le risque d'inondations en se basant sur l'évaluation du dommage annuel moyen (DAM). La méthodologie adoptée se base sur une simulation Monte Carlo (voir section 2.4).

3.2.2 Description des données de bâtiments

3.2.2.1 Identification et validation des résidences dans la zone d'étude

Afin de dresser un portrait global du risque d'inondation dans le secteur étudié, une première étape qui consiste à identifier et valider les résidences concernées par ce risque est nécessaire. Les données sur les bâtiments ont été recueillies à partir de plusieurs sources : les informations relevées lors des campagnes de terrain (photos, observations), les données issues du questionnaire mené auprès des résidents du secteur en 2016 et les données du rôle d'évaluation de 2017 fournies par la MRC Brome-Missisquoi. Ces données contiennent les informations concernant la valeur, le nombre d'étages, la présence de sous-sol et son type d'occupation (habitable ou non) et le type de résidence pour chaque bâtiment.

La compilation des données a permis de faire l'inventaire de toutes les résidences se trouvant dans le secteur (voir annexe 3 et la figure ci-dessous). Au total, 80 résidences ont été identifiées.

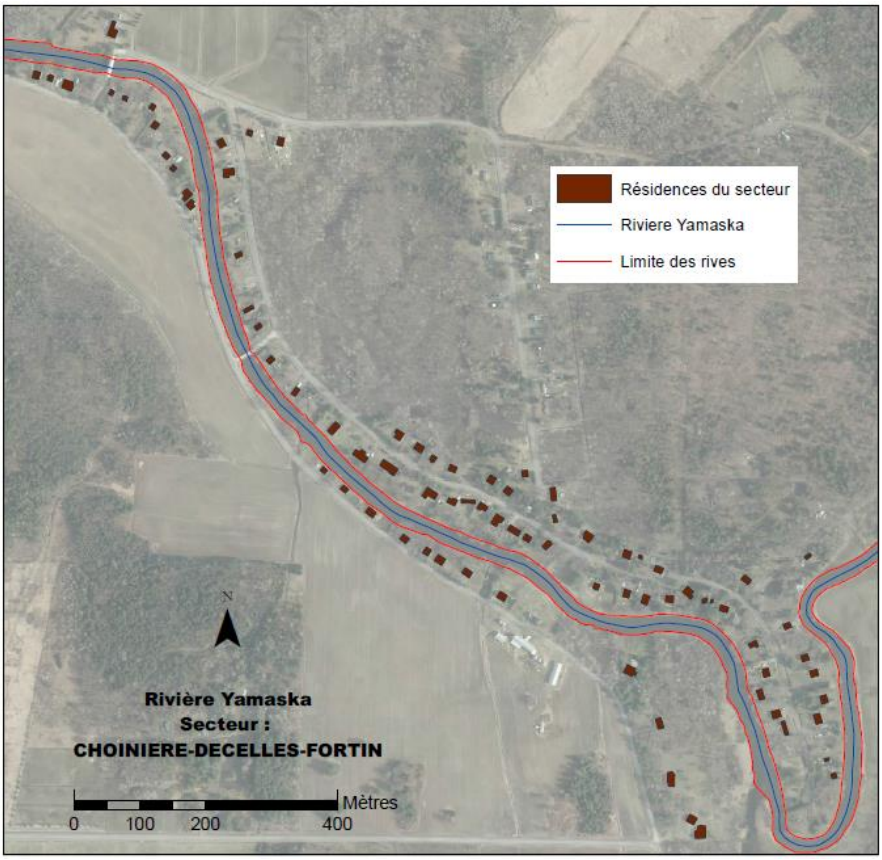


Figure 32 : Inventaire des résidences du secteur d'étude

3.2.2.2 Identification et validation des résidences principales

Afin d'identifier les résidences principales, l'adresse postale du propriétaire a été utilisée. Si cette dernière est différente de l'adresse du bâtiment en question, la résidence est considérée comme secondaire. Ainsi, les 80 résidences identifiées dans le secteur étudié sont réparties comme suit : 58 résidences principales et 22 résidences secondaires (voir figure 33).

Les hauteurs de premiers planchers des résidences principales du secteur à l'étude ont été mesurées par un arpenteur géomètre en avril 2018. Ces mesures figurent à l'annexe 4 du présent rapport (le rapport détaillé de ces travaux est à l'annexe 9). Ces données ont servi à évaluer le dommage annuel moyen de chaque résidence principale du secteur étudié.

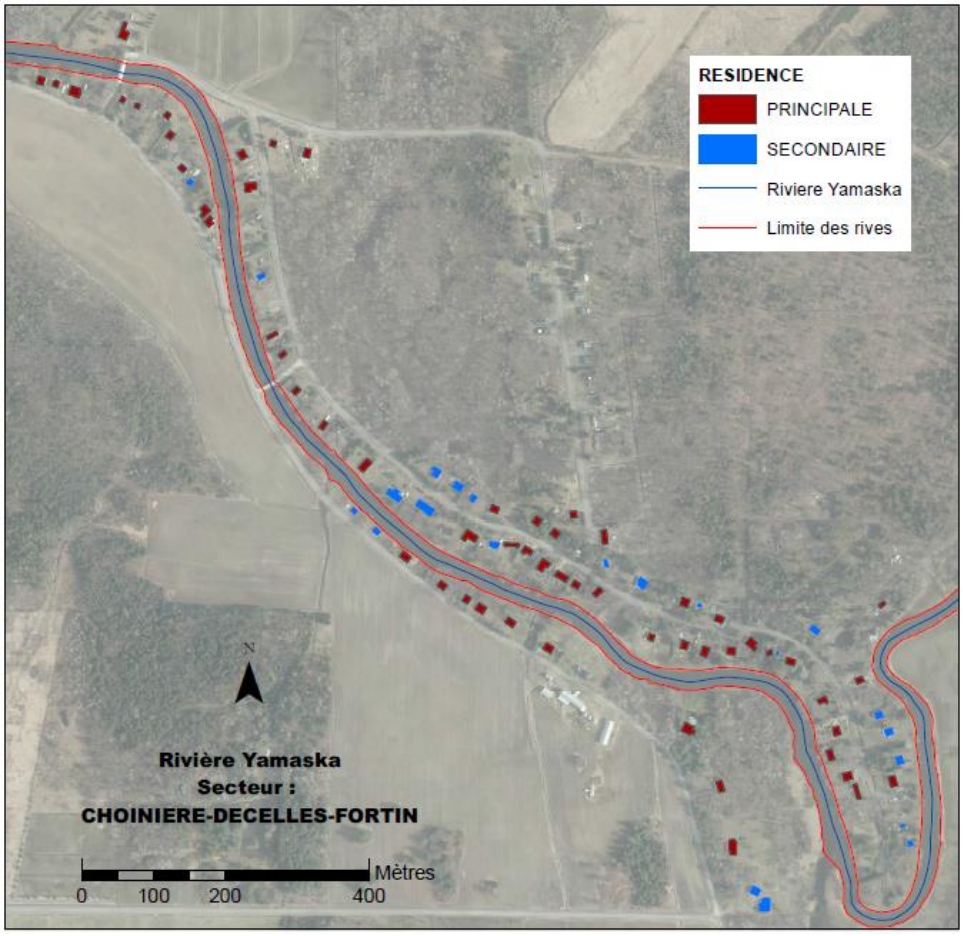


Figure 33 : Type de résidence (principale ou secondaire) pour les bâtiments étudiés

3.2.3 Résultats

Le dommage annuel moyen (DAM) des résidences principales du secteur à l'étude a été évalué (voir tableau ci-dessous) en se basant sur la méthodologie décrite précédemment. Le calcul du DAM a été effectué en considérant seulement les récurrences inférieures ou égales à 100 ans. En effet, la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) adoptée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement, et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) permet la construction, sous certaines conditions, dans la zone de faible courant, associée aux récurrences 20-100 ans.

Les résidences situées dans le secteur du méandre présentent un DAM total qui s'élève à 28 210 $ soit environ le 32 % du DAM de tout le secteur étudié (87 614 $). Toutefois, ce secteur ne représente que 12 % du nombre total des résidences principales.

Tableau 19 : DAM des résidences principales pour les récurrences < 100 ans

No civique	Voie publique	Valeur du bâtiment	Dommage (%)	Dommage ($)	Secteur
1	DECELLES	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
2	DECELLES	Non publique	Non publique	1 966 $	Decelles
3	DECELLES	Non publique	Non publique	12 $	Decelles
4	DECELLES	Non publique	Non publique	702 $	Decelles
5	DECELLES	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
6	DECELLES	Non publique	Non publique	- $	Decelles
7	DECELLES	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
8	DECELLES	Non publique	Non publique	184 $	Decelles
9	DECELLES	Non publique	Non publique	2 042 $	Decelles
10	DECELLES	Non publique	Non publique	3 758 $	Decelles
11	DECELLES	Non publique	Non publique	11 $	Decelles
12	DECELLES	Non publique	Non publique	15 $	Decelles
13	DECELLES	Non publique	Non publique	- $	Decelles
14	DECELLES	Non publique	Non publique	271 $	**Méandre**
15	DECELLES	Non publique	Non publique	12 612 $	**Méandre**
16	DECELLES	Non publique	Non publique	16 $	**Méandre**
17	DECELLES	Non publique	Non publique	21 $	**Méandre**
18	DECELLES	Non publique	Non publique	1 859 $	**Méandre**
19	DECELLES	Non publique	Non publique	27 $	**Méandre**
20	DECELLES	Non publique	Non publique	13 403 $	**Méandre**
21	DECELLES	Non publique	Non publique	902 $	Decelles
1	CHOINIERE	Non publique	Non publique	- $	Choinière
2	CHOINIERE	Non publique	Non publique	- $	Choinière
3	CHOINIERE	Non publique	Non publique	17 $	Choinière
4	CHOINIERE	Non publique	Non publique	338 $	Choinière
5	CHOINIERE	Non publique	Non publique	0 $	Choinière
6	CHOINIERE	Non publique	Non publique	2 372 $	Choinière
22	DECELLES	Non publique	Non publique	10 $	Decelles
23	DECELLES	Non publique	Non publique	651 $	Decelles
24	DECELLES	Non publique	Non publique	30 $	Decelles
25	DECELLES	Non publique	Non publique	10 $	Decelles
26	DECELLES	Non publique	Non publique	16 $	Decelles
7	CHOINIERE	Non publique	Non publique	4 656 $	Choinière
8	CHOINIERE	Non publique	Non publique	77 $	Choinière
1	FORTIN	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
2	FORTIN	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
27	DECELLES	Non publique	Non publique	3 $	Decelles
28	DECELLES	Non publique	Non publique	14 $	Decelles
9	CHOINIERE	Non publique	Non publique	3 227 $	Choinière

No civique	Voie publique	Valeur du bâtiment	Dommage (%)	Dommage ($)	Secteur
10	CHOINIERE	Non publique	Non publique	- $	Choinière
11	CHOINIERE	Non publique	Non publique	21 $	Choinière
12	CHOINIERE	Non publique	Non publique	13 $	Choinière
13	CHOINIERE	Non publique	Non publique	13 420 $	Choinière
14	CHOINIERE	Non publique	Non publique	11 $	Choinière
15	CHOINIERE	Non publique	Non publique	338 $	Choinière
3	FORTIN	Non publique	Non publique	210 $	Decelles
29	DECELLES	Non publique	Non publique	0 $	Decelles
4	FORTIN	Non publique	Non publique	44 $	Decelles
30	DECELLES	Non publique	Non publique	21 $	Decelles
31	DECELLES	Non publique	Non publique	2 $	Decelles
5	FORTIN	Non publique	Non publique	2 265 $	Decelles
32	DECELLES	Non publique	Non publique	9 181 $	Decelles
16	CHOINIERE	Non publique	Non publique	4 746 $	Choinière
17	CHOINIERE	Non publique	Non publique	7 408 $	Choinière
33	DECELLES	Non publique	Non publique	7 $	Decelles
18	CHOINIERE	Non publique	Non publique	0 $	Choinière
34	DECELLES	Non publique	Non publique	685 $	Decelles
19	CHOINIERE	Non publique	Non publique	20 $	Choinière
Total		**6 516 200.00 $**	**-**	**87 614 $**	**-**
Moyenne		**112 347.00 $**	**1.2 %**	**1 511 $**	**-**

La figure 34 illustre un aperçu du risque sous forme d'histogrammes (l'axe des ordonnées étant le nombre de résidences) en pourcentage et en valeur du DAM.

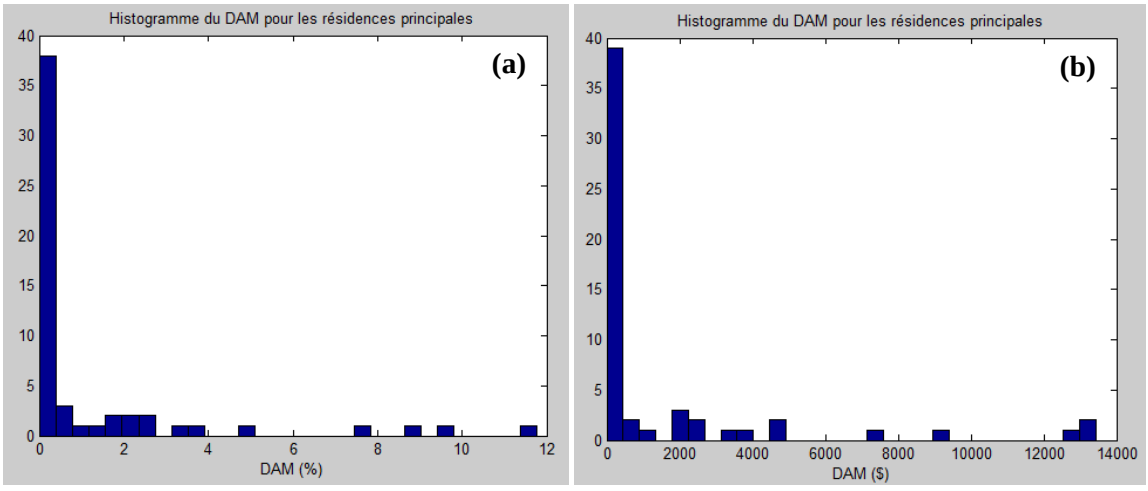


Figure 34 : Histogrammes des DAM des résidences principales pour les récurrences < 100 ans *(a) en pourcentage (b) en dollar*

4 Évaluation du risque aux personnes et aux véhicules

4.1.1 Objectif

L'objectif de cette partie du projet est d'évaluer le risque dans la zone d'étude des personnes et des véhicules vis-à-vis les inondations à partir de la vitesse d'écoulement et de la hauteur de submersion du terrain associées à l'aléa.

4.1.2 Méthodologie

Afin d'évaluer le risque d'inondation pour les personnes et les véhicules, l'indice HR (Hazard Rating) qui a été développé dans les travaux de Surendran et al. (2008) a été utilisé (voir équation ci-dessous). Cet indice intègre la vitesse et la profondeur de l'eau ainsi que l'influence des débris possiblement présent dans l'eau sur le niveau de risque (voir tableau ci-dessous) :

$$HR = D\,x\,(V + 0.5) + DF \quad (5)$$

Où : V est la vitesse en m/s,

D est la profondeur de l'eau en m

DF est le facteur des débris

Alors si D < 0,25 m, DF = 0,5 et si D > 0,25 m, DF = 1.

Des niveaux de risque sont définis pour les personnes selon la valeur de HR :

- Moins de 0,75 : très faible – faire attention;
- 0,75 à 1,25 : risqué pour certains, inclus les enfants, les personnes âgées et les handicapés;
- 1,25 à 2,0 : risqué pour la plupart, dont le public général;
- Plus de 2,0 : risqué pour tous, incluant les services d'urgence.

Le tableau suivant (Surendran et al., 2008) reprend sous forme visuelle les valeurs de HR, en fonction de V, D et DF, en y associant un code couleur.

Tableau 20 : Tableau d'appréciation du risque

Niveau de risque d'inondation (HR)	Code couleur	Classification du risque à la population
Moins de 0.75		Risque très faible
Entre 0.75 et 1.25		Risque pour certains (enfants, personnes âgées, …)
Entre 1.25 et 2.0		Risque pour la population en général
Plus que 2.0		Risque pour tous (incluant les services d'urgence)

HR	Depth of flooding - d (m)												
	DF = 0.5				DF = 1								
Velocity - v (m/s)	0.05	0.10	0.20	0.25	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.50	2.00	2.50
0.0	0.03 + 0.5 = 0.53	0.05 + 0.5 = 0.55	0.10 + 0.5 = 0.60	0.13 + 0.5 = 0.63	0.15 + 1.0 = 1.15	0.20 + 1.0 = 1.20	0.25 + 1.0 = 1.25	0.30 + 1.0 = 1.30	0.40 + 1.0 = 1.40	0.50 + 1.0 = 1.50	0.75 + 1.0 = 1.75	1.00 + 1.0 = 2.00	1.25 + 1.0 = 2.25
0.1	0.03 + 0.5 = 0.53	0.06 + 0.5 = 0.56	0.12 + 0.5 = 0.62	0.15 + 0.5 = 0.65	0.18 + 1.0 = 1.18	0.24 + 1.0 = 1.24	0.30 + 1.0 = 1.30	0.36 + 1.0 = 1.36	0.48 + 1.0 = 1.48	0.60 + 1.0 = 1.60	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.55
0.3	0.04 + 0.5 = 0.54	0.08 + 0.5 = 0.58	0.15 + 0.5 = 0.65	0.19 + 0.5 = 0.69	0.23 + 1.0 = 1.23	0.30 + 1.0 = 1.30	0.38 + 1.0 = 1.38	0.45 + 1.0 = 1.45	0.60 + 1.0 = 1.60	0.75 + 1.0 = 1.75	1.13 + 1.0 = 2.13	1.50 + 1.0 = 2.50	1.88 + 1.0 = 2.88
0.5	0.05 + 0.5 = 0.55	0.10 + 0.5 = 0.60	0.20 + 0.5 = 0.70	0.25 + 0.5 = 0.75	0.30 + 1.0 = 1.30	0.40 + 1.0 = 1.40	0.50 + 1.0 = 1.50	0.60 + 1.0 = 1.60	0.80 + 1.0 = 1.80	1.00 + 1.0 = 2.00	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	2.50 + 1.0 = 3.50
1.0	0.08 + 0.5 = 0.58	0.15 + 0.5 = 0.65	0.30 + 0.5 = 0.80	0.38 + 0.5 = 0.88	0.45 + 1.0 = 1.45	0.60 + 1.0 = 1.60	0.75 + 1.0 = 1.75	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.50	2.25 + 1.0 = 3.25	3.00 + 1.0 = 4.00	3.75 + 1.0 = 4.75
1.5	0.10 + 0.5 = 0.60	0.20 + 0.5 = 0.70	0.40 + 0.5 = 0.90	0.50 + 0.5 = 1.00	0.60 + 1.0 = 1.60	0.80 + 1.0 = 1.80	1.00 + 1.0 = 2.00	1.20 + 1.0 = 2.20	1.60 + 1.0 = 2.60	2.00 + 1.0 = 3.00	3.00 + 1.0 = 4.00	4.00 + 1.0 = 5.00	5.00 + 1.0 = 6.00
2.0	0.13 + 0.5 = 0.63	0.25 + 0.5 = 0.75	0.50 + 0.5 = 1.00	0.63 + 0.5 = 1.13	0.75 + 1.0 = 1.75	1.00 + 1.0 = 2.00	1.25 + 1.0 = 2.25	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	3.50	4.75	6.00	7.25
2.5	0.15 + 0.5 = 0.65	0.30 + 0.5 = 0.80	0.60 + 0.5 = 1.10	0.75 + 0.5 = 1.25	0.90 + 1.0 = 1.90	1.20 + 1.0 = 2.20	1.50 + 1.0 = 2.50	1.80 + 1.0 = 2.80	3.40	4.00	5.50	7.00	8.50
3.0	0.18 + 0.5 = 0.68	0.35 + 0.5 = 0.85	0.70 + 0.5 = 1.20	0.88 + 0.5 = 1.38	1.05 + 1.0 = 2.05	1.40 + 1.0 = 2.40	1.75 + 1.0 = 2.75	3.10	3.80	4.50	6.25	8.00	9.75
3.5	0.20 + 0.5 = 0.70	0.40 + 0.5 = 0.90	0.80 + 0.5 = 1.30	1.00 + 0.5 = 1.50	1.20 + 1.0 = 2.20	1.60 + 1.0 = 2.60	3.00	3.40	4.20	5.00	7.00	9.00	11.00
4.0	0.23 + 0.5 = 0.73	0.45 + 0.5 = 0.95	0.90 + 0.5 = 1.40	1.13 + 0.5 = 1.63	1.35 + 1.0 = 2.35	1.80 + 1.0 = 2.80	3.25	3.70	4.60	5.50	7.75	10.00	12.25
4.5	0.25 + 0.5 = 0.75	0.50 + 0.5 = 1.00	1.00 + 0.5 = 1.50	1.25 + 0.5 = 1.75	1.50 + 1.0 = 2.50	2.00 + 1.0 = 3.00	3.50	4.00	5.00	6.00	8.50	11.00	13.50
5.0	0.28 + 0.5 = 0.78	0.60 + 0.5 = 1.10	1.10 + 0.5 = 1.60	1.38 + 0.5 = 1.88	1.65 + 1.0 = 2.65	3.20	3.75	4.30	5.40	6.50	9.25	12.00	14.75

4.1.3 Cartographie du risque aux personnes et aux véhicules

Les cartes de risque pour les récurrences 2, 20 et 100 ans sont présentées dans les figures ci-dessous (les cartes correspondantes à toutes les récurrences sont présentées dans l'annexe 7). Le niveau du risque est variable selon la période de retour. Pour une période de retour de 2 ans, le risque élevé est principalement localisé dans le lit. Plus le débit augmente, plus le risque élevé s'étend sur les plaines inondables, et ce, plus particulièrement dans le secteur du méandre qui montre un risque important dès les premiers scénarios de récurrence. Également, la seule voie de sortie (la rue Decelles) est coupée. Ceci pourrait justifier une intervention prioritaire dans ce secteur.

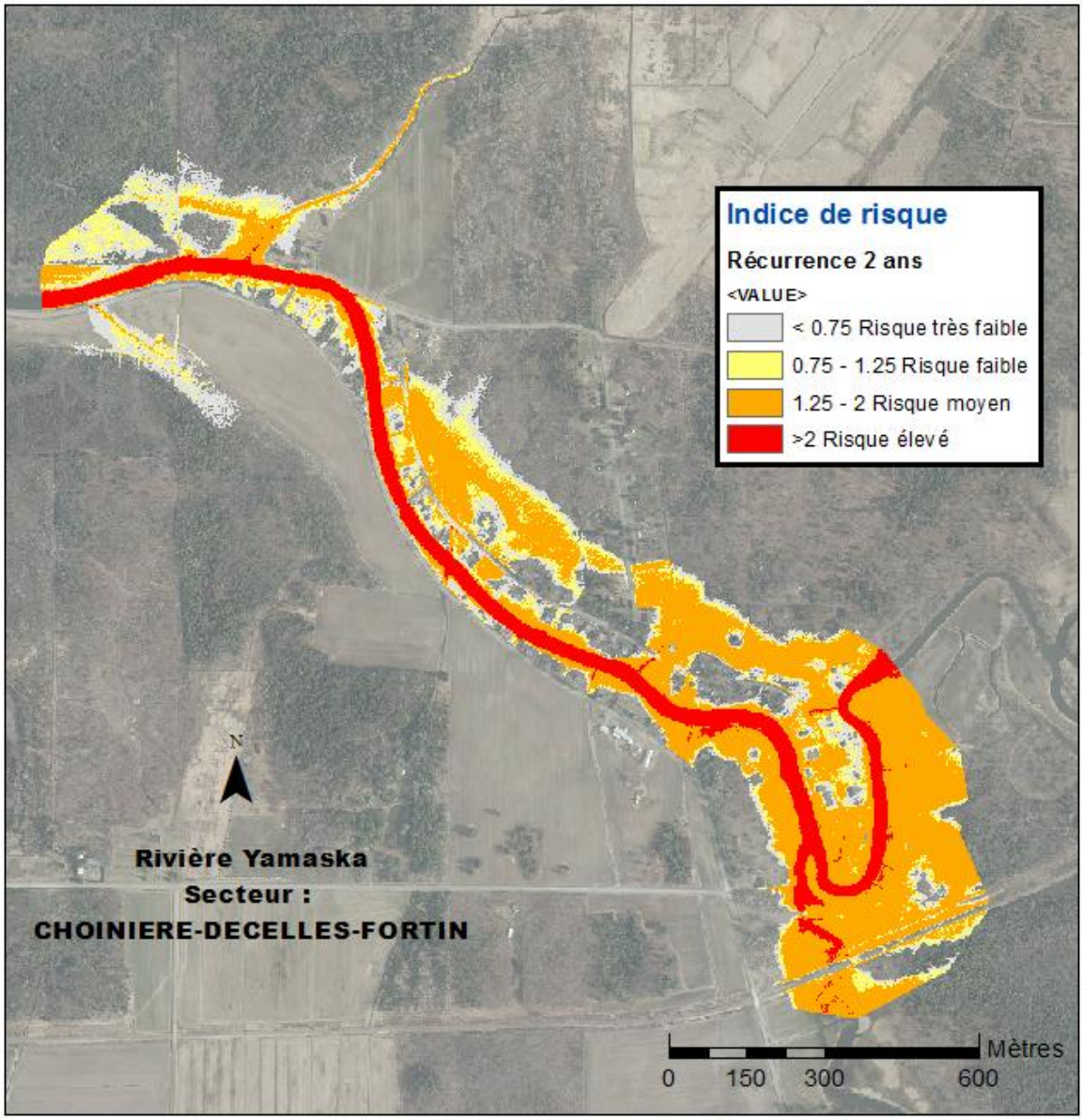


Figure 35 : Carte de risque pour la récurrence 2 ans

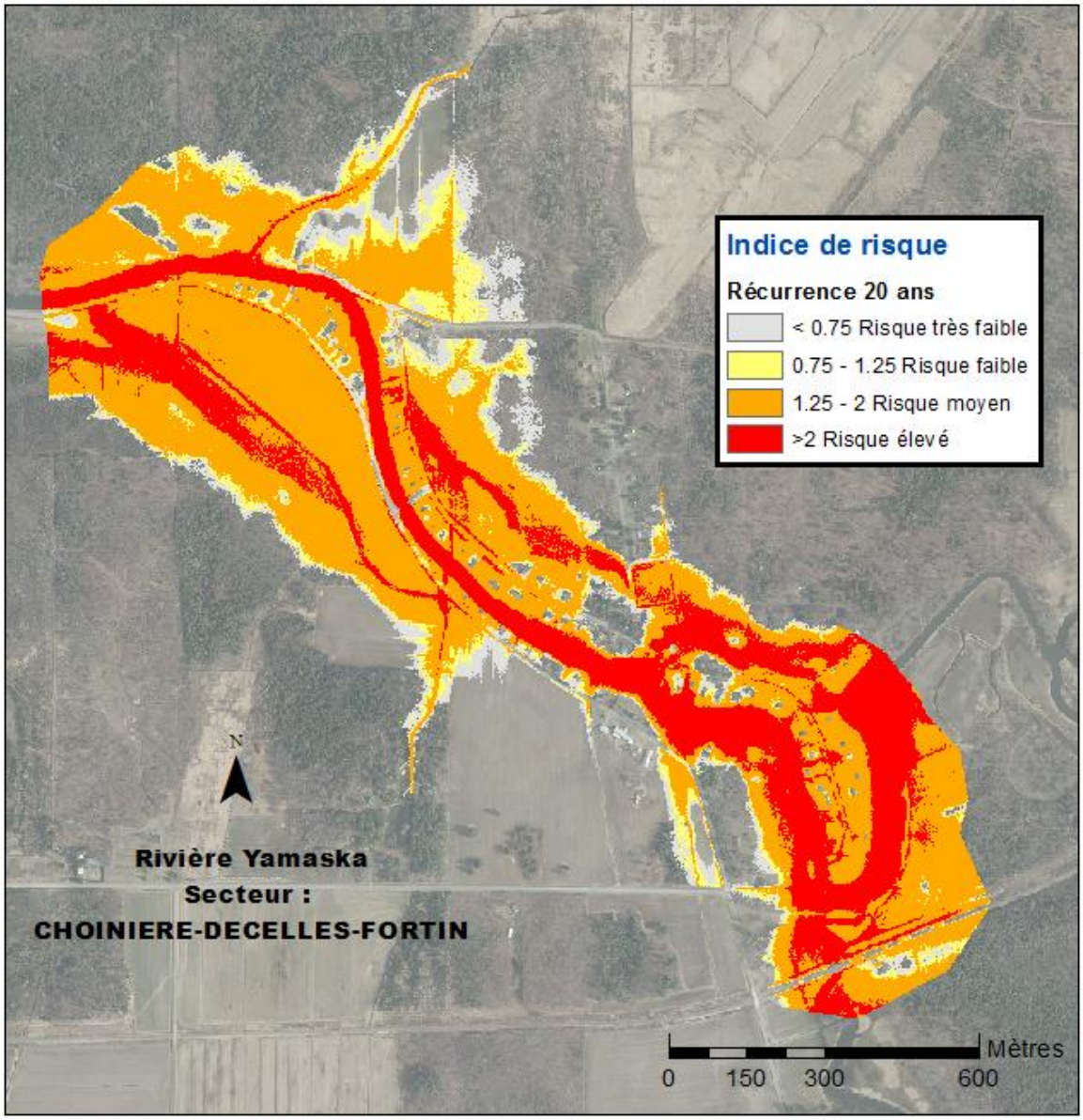


Figure 36 : Carte de risque pour la récurrence 20 ans

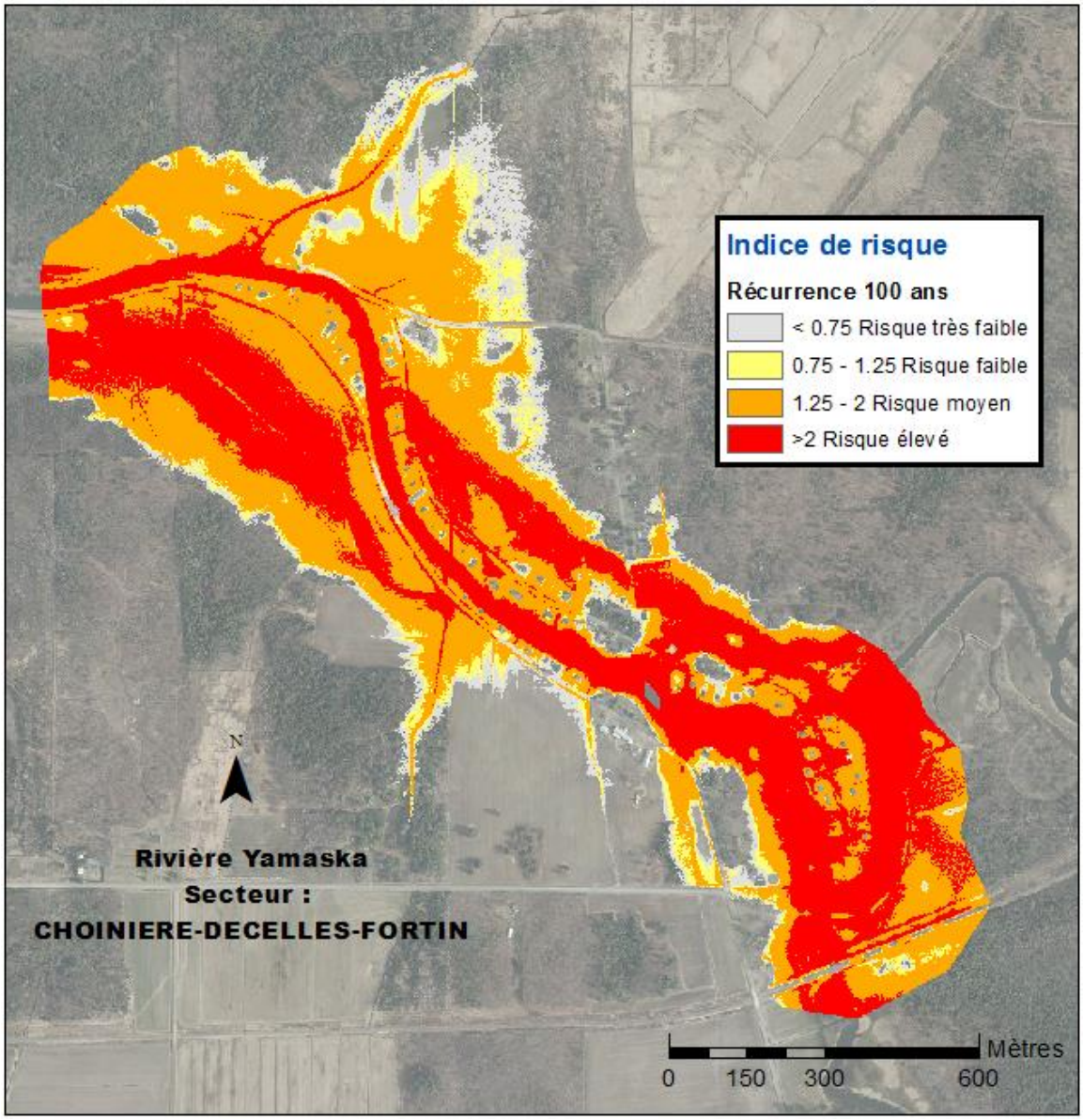


Figure 37 : Carte de risque pour la récurrence 100 ans

5 Évaluation des mesures de gestion et de mitigation contre les risques d'inondations

5.1 Évaluation des coûts et des avantages des mesures de mitigation

5.1.1 Méthodologie

Trois principales mesures de mitigation contre les inondations ont été étudiées : le rehaussement de certaines sections de rues publiques afin de garantir un passage aux véhicules d'urgence, l'immunisation des résidences principales, et le rachat et le retrait des bâtiments situés dans le secteur du méandre. Afin d'identifier les mesures de mitigation les plus adaptées, une étude de rentabilité économique a été effectuée. Cette étude qui consiste à réaliser une analyse coût-avantage de chaque mesure constitue une aide à la décision permettant d'évaluer la pertinence d'un aménagement de protection contre les inondations.

L'analyse coût-avantage prend en considération les avantages et les coûts d'une mesure pour évaluer la pertinence économique de celle-ci. L'analyse coût-avantage se base sur plusieurs indicateurs économiques: la valeur actualisée nette (VAN) et le ratio avantages-coûts. Le calcul de ces indicateurs suppose la prise en compte d'hypothèses sur la durée de vie du projet et le facteur d'actualisation.

Au-delà de la situation de référence (statu quo) qui est la simulation de crues dans l'état actuel, quatre scénarios ont été simulés :

- Scénario 1 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le méandre
- Scénario 2 : Immunisation des résidences principales
- Scénario 3 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le méandre et immunisation des bâtiments
- Scénario 4 : Rehaussement de certaines sections de rues publiques

5.1.1.1 Identification des avantages et des coûts

Les avantages retenus sont de deux types : avantages directs physiques et avantages indirects. Les avantages directs comprennent essentiellement l'ensemble des dommages évités aux résidences. D'autre part, les avantages indirects sont principalement les impacts générés par les solutions envisagés. Pour calculer ces avantages, il est donc

nécessaire d'évaluer les coûts des inondations en situation « statu quo », puis en situation « mesure » pour les différents scénarios étudiés.

5.1.1.2 Paramètres retenus

- *Taux d'actualisation*

Le taux d'actualisation est défini comme une « opération mathématique qui permet de comparer des valeurs économiques qui s'échelonnent dans le temps : il s'agit de ramener la valeur future d'un bien, d'une dépense à une valeur actuelle » (Lamari et al., 2015). Le taux d'actualisation utilisé dans le cadre de cette étude est de 4 %. Celui-ci a été retenu par le MSP.

- *Horizon temporel du projet*

L'horizon temporel correspond à la durée sur laquelle sont considérés les flux de coûts et de bénéfices associés au projet. La vie économique de la présente étude est de 50 ans.

5.1.1.3 Estimation des bénéfices

- *Dommage annuel moyen*

Le dommage annuel moyen (DAM) dans les conditions actuelles a été tout d'abord estimé afin de servir comme base de comparaison par rapport aux coûts des différents scénarios. Le DAM exprime les coûts annuels des dommages, ce qui correspond donc à ce qui devrait être provisionné (en intégrant l'actualisation) chaque année pour faire face aux dommages éventuels.

Le DAM total correspondant aux résidences principales s'élève à **87 614$**. Cette évaluation ne prend pas en compte les infrastructures publiques soumises aux risques d'inondations.

- *Dommages évités actualisés*

Les bénéfices évalués correspondent au dommage annuel moyen évité (DAME). Ce DAME correspond à des dommages tangibles et directs et peuvent être comparés aux coûts de mise en œuvre de la mesure de mitigation.

Le DAME est la différence entre les DAM avant et après la mise en place de la mesure de mitigation :

$$DAME = DAM\ (sans\ mesure) - DAM\ (avec\ mesure) \quad (6)$$

Pour un taux d'actualisation r, la valeur actualisée (VA) d'une valeur future *B* à la période *t* se calcule à l'aide de la formule suivante (Webster et al. 2008) :

$$VA = \frac{B_t}{(1+r)^t} \quad (7)$$

Ainsi, la somme des DAM actualisés (SDAMA) sur la durée de vie économique du projet (n) se calcule en utilisant l'équation ci-dessous.

$$SDAMA = \sum_{t=0}^{n} \frac{DMA_t}{(1+r)^t} \quad (8)$$

Pour l'état actuel, SDAMA s'élève à 1 969 761 $.

La somme des DAME actualisés (SDAMEA) est la différence entre le SDAMA avant et après la mise en place de la mesure de mitigation :

$$SDAMEA = SDAMA\ (sans\ mesure) - SDAMA\ (avec\ mesure) \quad (9)$$

5.1.1.4 Estimation des coûts liés au projet

L'analyse avantages-coûts compare les bénéfices et les coûts d'une mesure d'atténuation à la suite de l'analyse de risque. Ces coûts doivent donc être identifiés et quantifiés pour les différents scénarios envisagés.

5.1.1.5 Détermination des indicateurs d'aide à la décision

À partir du DEMA et des coûts du projet, on peut calculer le rapport des avantages totaux sur les coûts totaux ou la valeur actualisée nette (VAN) (Penning-Rowsell et al., 2013). Ces deux indicateurs prennent en compte les coûts et les bénéfices (dommages évités) de la mesure envisagée. Ils servent à déterminer le scénario qui offre la meilleure rentabilité ou le projet qui doit être considéré en priorité.

La valeur actualisée nette (VAN) est un indicateur économique qui permet de déterminer l'efficience économique d'un projet. La formule de calcul de ce critère est la suivante :

$$VAN = \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{(1+r)^i}(A_i - C_i) = SDAMEA - \sum_{i=0}^{n} \frac{1}{(1+r)^i} C_i \quad (10)$$

Avec, C_i : la somme des coûts de projet à l'année i

A_i : les avantages du projet considéré comme les dommages évités annuels

n : l'horizon temporel de la mesure

r : le taux d'actualisation à l'année.

Un autre critère de choix, équivalent à la VAN, est le rapport des bénéfices totaux, ici le SDAMEA, sur les coûts totaux, qui illustre la rentabilité :

$$\frac{A}{C} = \frac{SDAMEA}{\sum_{i=0}^{n} \frac{C_i}{(1+r_i)^i}} \quad (11)$$

5.1.2 Scénario 1 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le secteur du méandre

Les résidences situées dans le secteur du méandre présentent le niveau de risque le plus élevé. Comme présenté dans le paragraphe 3.2.3, le DAM associé au méandre présente environ 32 % du DAM de tout le secteur étudié. De plus, le méandre est le secteur le plus à risque pour les personnes et les véhicules. Ainsi, la première mesure de mitigation consiste au rachat et au retrait des résidences principales situées dans ce secteur. Selon les données fournies par le MSP, le coût de retrait d'un bâtiment est estimé à 25 000 $. Dans le secteur d'étude, 7 résidences principales ont été identifiées pour être retirées (voir le tableau ci-dessous). Le coût de rachat de ces résidences s'élève à 871 100 $. Le retrait des résidences situées dans le secteur du méandre entrainera une perte de revenu pour la municipalité en termes des taxes recueillies. Cette perte a été évaluée à 6 533 $ (0.75 $ par 100 $ de la valeur de la résidence au rôle d'évaluation). La valeur totale actualisée sur 50 ans de cette perte s'élève à 146 882 $.

Tableau 21 : Liste des résidences à retirer

No civique	Voie publique	Valeur du terrain	Valeur du bâtiment
14	DECELLES	Non publique	Non publique
15	DECELLES	Non publique	Non publique
16	DECELLES	Non publique	Non publique
17	DECELLES	Non publique	Non publique
18	DECELLES	Non publique	Non publique
19	DECELLES	Non publique	Non publique
20	DECELLES	Non publique	Non publique
Total		**188 100 $**	**683 000 $**

Le coût total du premier scénario de mitigation s'élève à 1 192 982 $ (871 100 $ pour le rachat des résidences, 146 882 $ de perte de revenu pour la municipalité et 175 000 $ pour le retrait). L'analyse coût-bénéfice correspondant à cette mesure est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Analyse coût-bénéfice correspondant au premier scénario de mitigation

DAM ($/an)	SDAMA	SDAMEA	Coût total	VAN	$\frac{A}{C}$
59 463 $	1 336 857 $	604 752 $	1 192 982 $	-588 230 $	0.51

5.1.3 Scénario 2 : Immunisation des résidences principales

L'immunisation des résidences consiste essentiellement à soulever le premier plancher au-dessus du niveau d'eau correspondant à une récurrence 100 ans, de déplacer tout équipement fonctionnel du sous-sol aux étages supérieurs et de reconstruire les murs du sous-sol en béton tout en éliminant toutes les fenêtres ou ouvertures situées sous la cote de récurrence 100 ans. L'immunisation d'une résidence principale coûterait, selon les données du MSP, 60 000 $. Ce montant inclut les frais d'études, les coûts d'ingénierie et d'arpentage, ainsi que les coûts de levage et de reconstruction.

Dans le secteur d'étude hors du méandre, 14 résidences principales doivent être immunisés. Ces bâtiments se divisent en deux catégories : des bâtiments qui ont un premier plancher au-dessous du niveau 100 ans (7) et des bâtiments qui ont un premier plancher au-dessus du niveau 100 ans, mais qui ont un sous-sol fini (7). Le coût total d'immunisation des bâtiments dans le secteur hors du méandre s'élève alors à 840 000 $. Si les résidences principales (5) situées dans le méandre sont considérées, des coûts supplémentaires de 300 000 $ devraient être ajoutés. Le coût total d'immunisation des résidences principales s'élève alors à 1 140 000 $. L'analyse coût-bénéfice correspondant à cette mesure est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 23 : Analyse coût-bénéfice correspondant au deuxième scénario de mitigation

DAM ($/an)	SDAMA	SDAMEA	Coût total	VAN	$\frac{A}{C}$
21 936 $	493 174 $	1 476 587 $	1 140 000 $	336 587 $	1.30

Si on élimine les résidences avec un DAM < 100 $, seulement 12 résidences devraient être immunisées avec un cout total de 720 000 $. L'analyse coût-bénéfice correspondant à ce scénario est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 24 : Analyse coût-bénéfice correspondant au deuxième scénario de mitigation – Immunisation des résidences avec un DAM > 100 $

DAM ($/an)	SDAMA	SDAMEA	Coût total	VAN	$\frac{A}{C}$
22 149 $	497 960 $	1 471 801 $	720 000 $	751 801 $	2.04

5.1.4 Scénario 3 : Rachat et retrait des résidences principales situées dans le secteur du méandre et immunisation des bâtiments

Le coût total associé à ce scénario s'élève à 2 032 982 $ (1 192 982 $ pour le rachat et le retrait des résidences dans le méandre et 840 000 $ pour l'immunisation des résidences principales). L'analyse coût-bénéfice correspondant à ce scénario est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 25 : Analyse coût-bénéfice correspondant au troisième scénario de mitigation

DAM ($/an)	SDAMA	SDAMEA	Coût total	VAN	$\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}}$
20 090 $	431 581 $	1 450 566 $	2 032 982 $	-582 416 $	0.71

Si on élimine les résidences avec un DAM < 100 $, seulement 9 résidences devraient être immunisées avec un coût total de 540 000 $. Le coût total associé à ce scénario s'élève alors à 1 732 982 $ (1 192 982 $ pour le rachat et le retrait des résidences dans le méandre et 540 000 $ pour l'immunisation des résidences principales). L'analyse coût-avantage correspondant à ce scénario est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 26 : Analyse coût-bénéfice correspondant au troisième scénario de mitigation - Immunisation des résidences avec un DAM > 100 $

DAM ($/an)	SDAMA	SDAMEA	Coût total	VAN	$\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}}$
20 254 $	455 363 $	1 514 398 $	1 732 982 $	-218 584 $	0.87

5.1.5 Scénario 4 : Rehaussement de certaines sections de rues publiques

La figure 38 présente la carte des profondeurs d'eau de l'ensemble du secteur d'étude pour une période de retour de 100 ans. La quasi-totalité de la rue Decelles ainsi que quelques tronçons du chemin Choinière (illustrés par les cercles noirs sur la figure 38) sont submergés.

Selon les travaux de Simard (2015), on considère que les véhicules d'urgence peuvent circuler dans des profondeurs d'eau qui peuvent atteindre jusqu'à 60 cm. Dans le cadre de la présente étude, cette limite a été fixée à 50 cm en se basant sur l'avis d'experts du MSP.

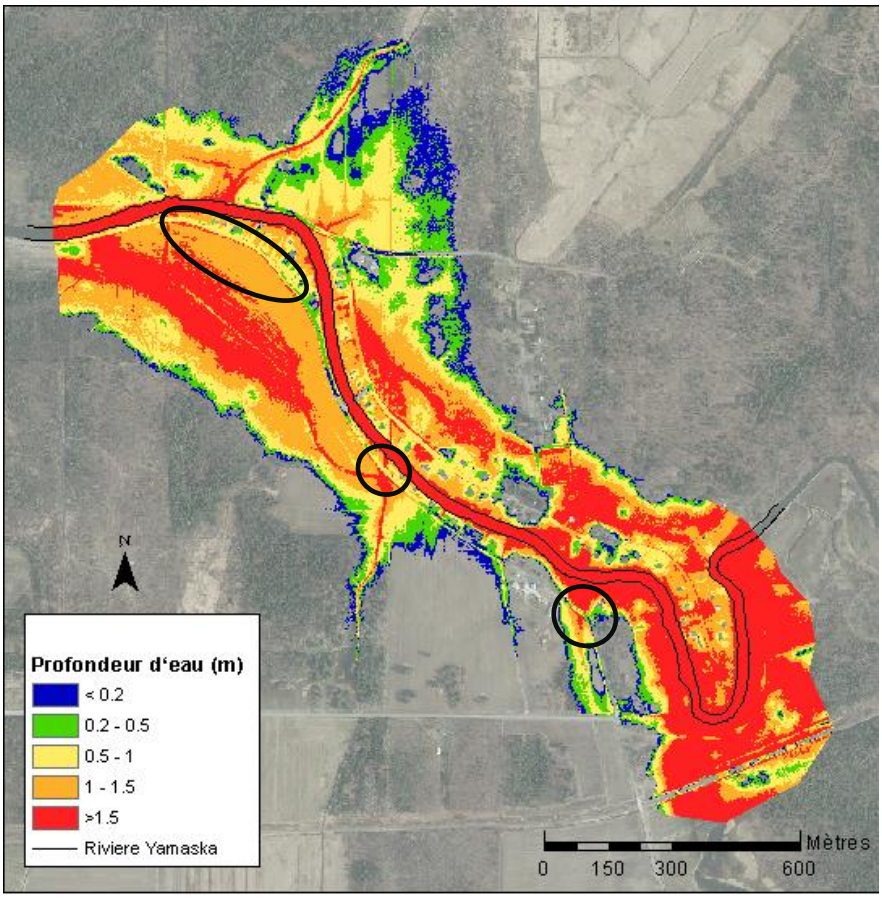


Figure 38 : Carte de profondeur d'eau pour un événement de récurrence 100 ans

La figure 39 présente le profil de hauteur d'eau le long de la rue Decelles pour un événement de récurrence 100 ans. Cette figure présente le niveau d'eau par rapport au niveau de la route durant un sinistre. Elle présente également les niveaux que devrait avoir la route pour permettre le passage :

- de tout type de véhicule (trait rouge), limite estimée à 15 cm d'eau;
- des véhicules d'urgence (trait vert), limite estimée à 50 cm d'eau.

Seul le secteur 4 (en aval du croisement Chemin Fortin /rue Decelles) de la figure 39 présente une topographie suffisante pour être protégé des sinistres.

Les mêmes profils ont été réalisés pour le chemin Choinière (voir figure 40). Cette figure met en évidence les portions de route problématiques qui devront être rehaussées, soient les secteurs 1, 3 et 4 de la figure 40.

Des profils de remblais transversaux des routes Decelles et Choinière sont présentés de façon détaillée dans les figures 42 et 44. Ces figures présentent une estimation des hauteurs de remblais à envisager pour garantir le passage d'un véhicule d'urgence (50 cm en dessous du niveau d'eau de récurrence 100 ans) le long de la rue Decelles d'une part et le chemin Choinière d'autre part. Une hauteur maximale de remblais de 86 cm est à prévoir pour la route Decelles et 50 cm pour le chemin Choinière. Les figures 41 et 43 permettent d'identifier les sections à remblayer sur un plan cartographique. Il est à noter que la portion de route située dans le secteur du méandre de la rue Decelles a été exclue du plan de rehaussement étant donné que les résidences situées dans ce secteur pourraient être retirées.

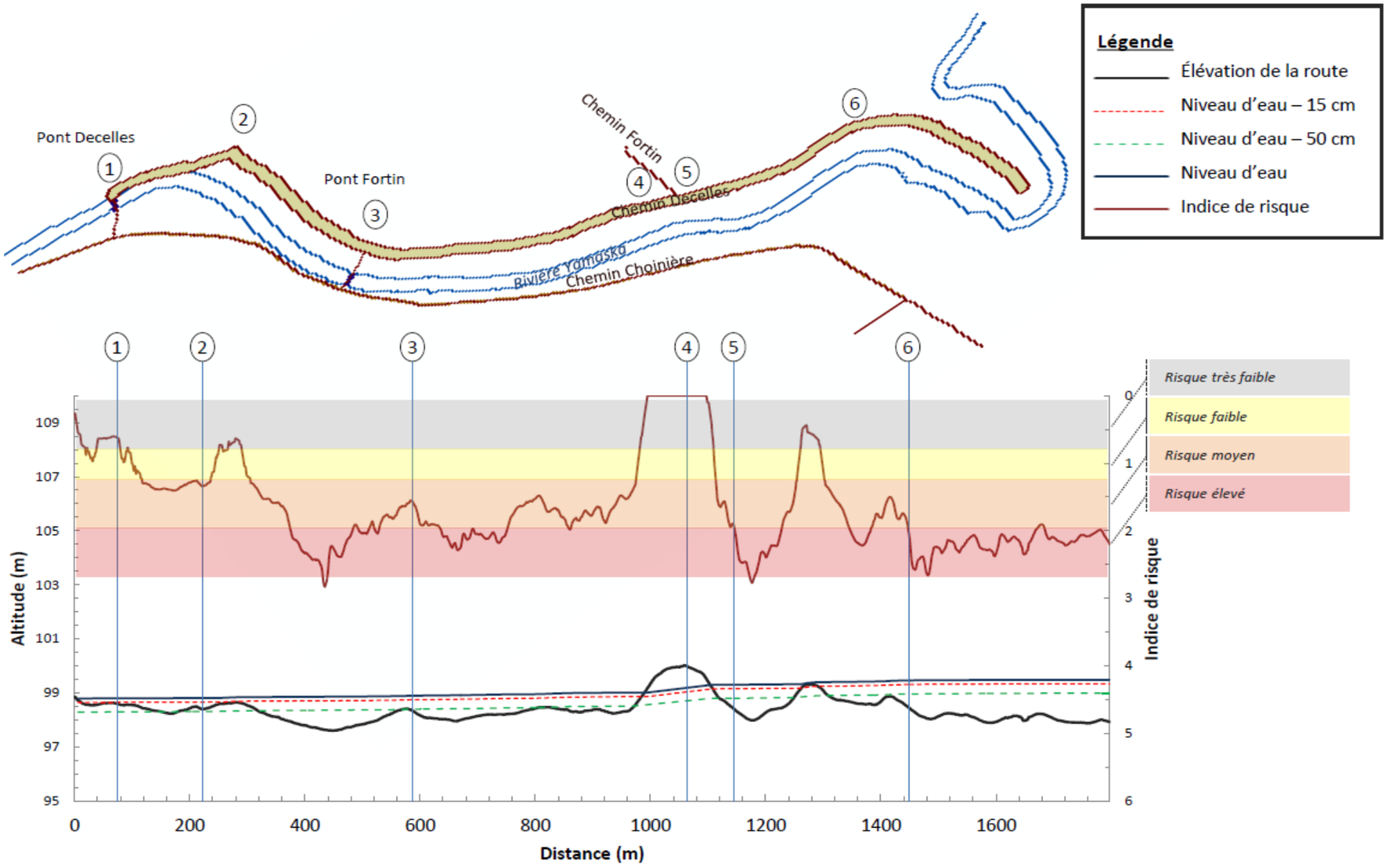


Figure 39 : Profil de la rue Decelles pour une récurrence de 100 ans, résultats obtenus par simulation sous HEC RAS 5.0.3

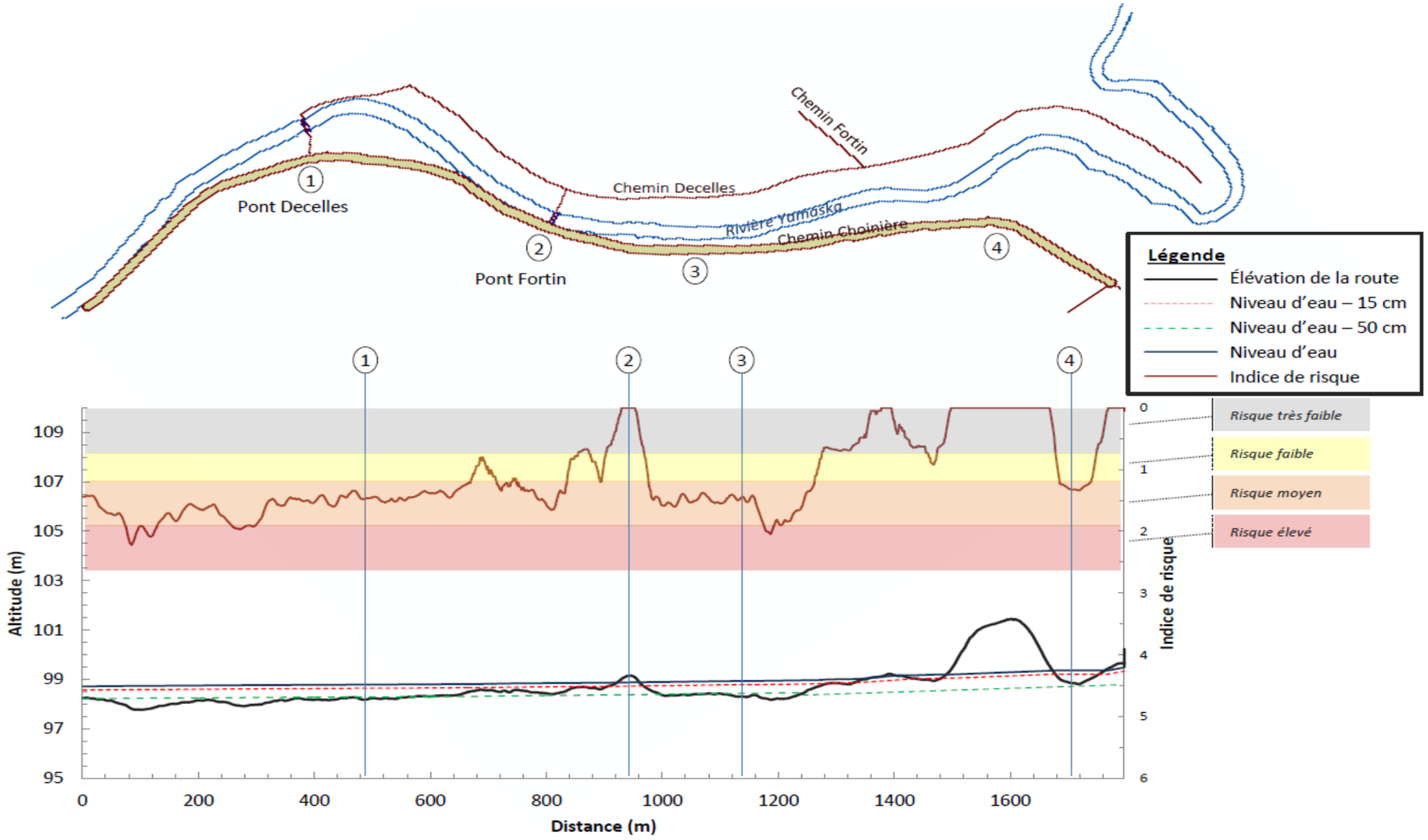


Figure 40 : Profil du chemin Choinière pour une récurrence de 100 ans, résultats obtenus par simulation sous HEC RAS 5.0.3

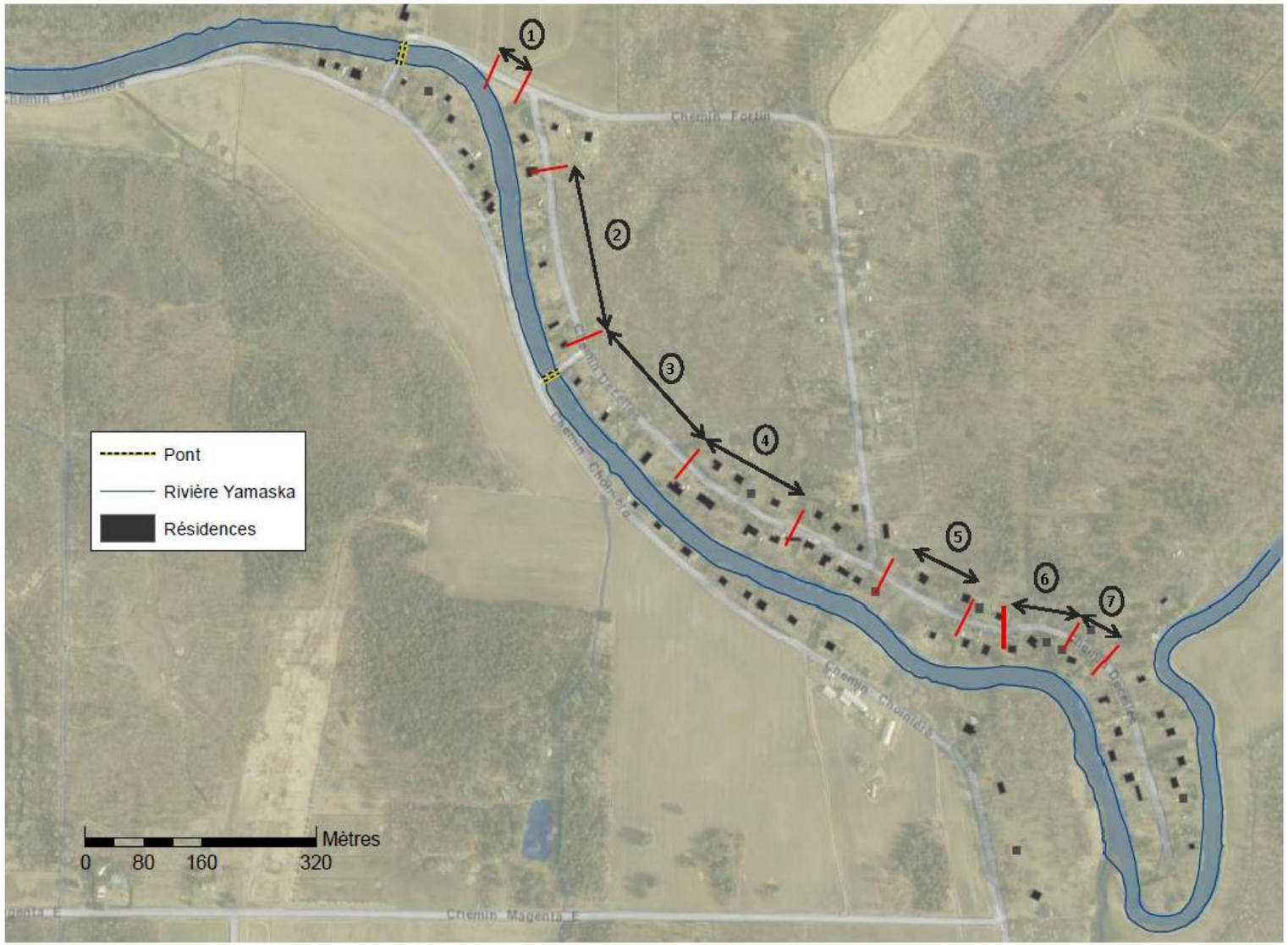


Figure 41: Sections à remblayer de la route Decelles

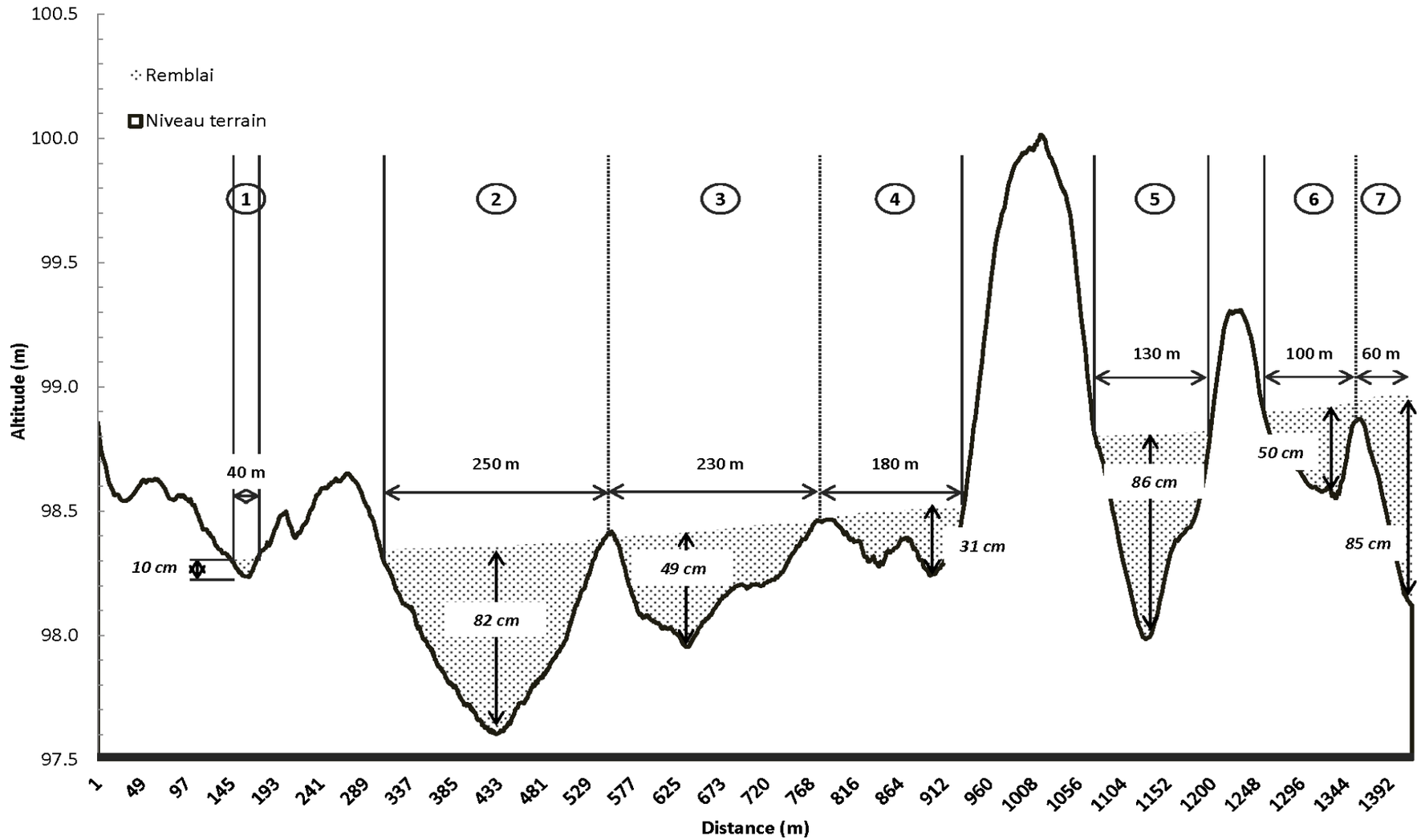


Figure 42: Scénario de rehaussement de la rue Decelles à hauteur de 50 cm en dessous du niveau d'eau pour la récurrence 100 ans

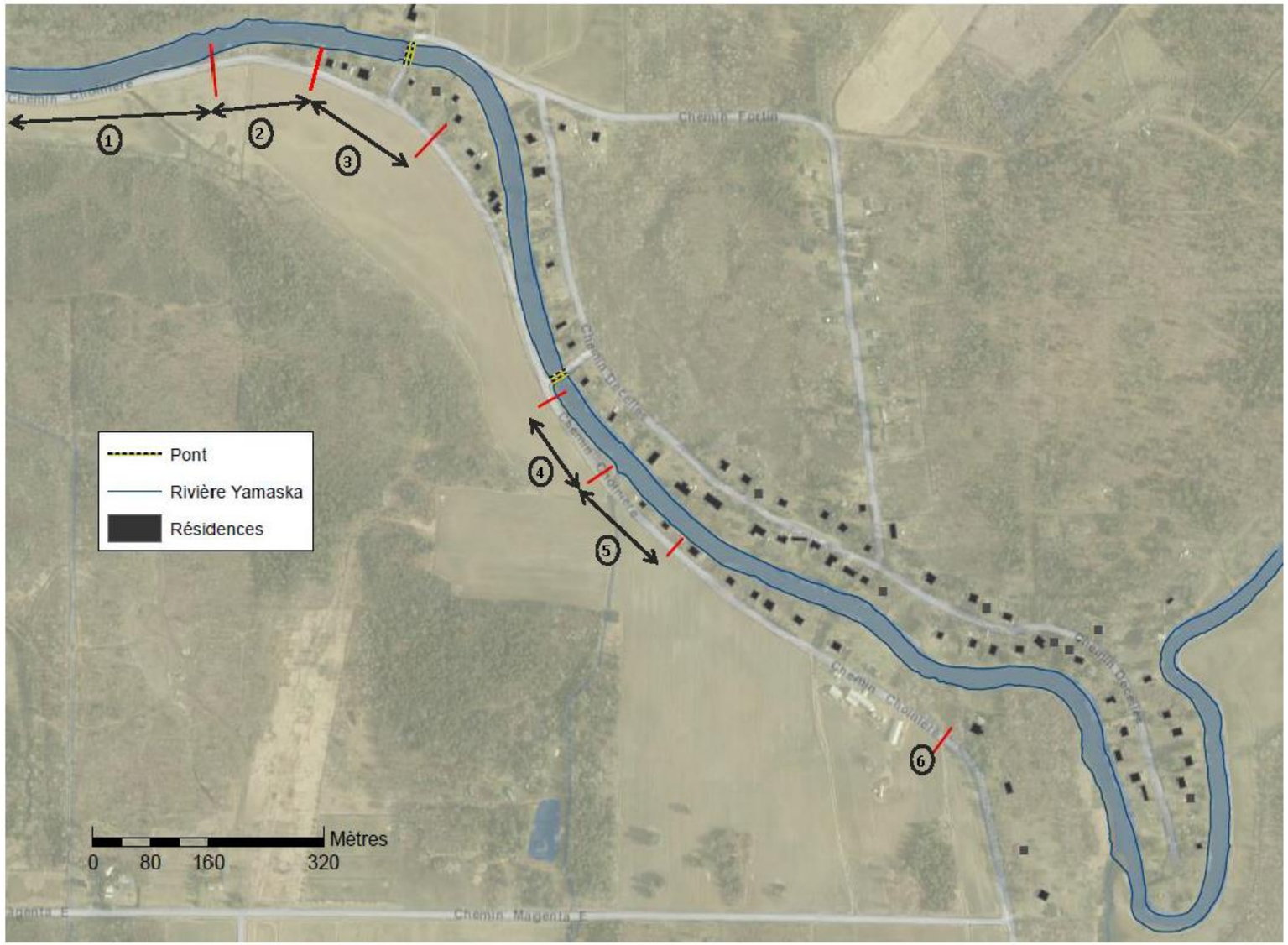


Figure 43: Sections à remblayer du chemin Choinière

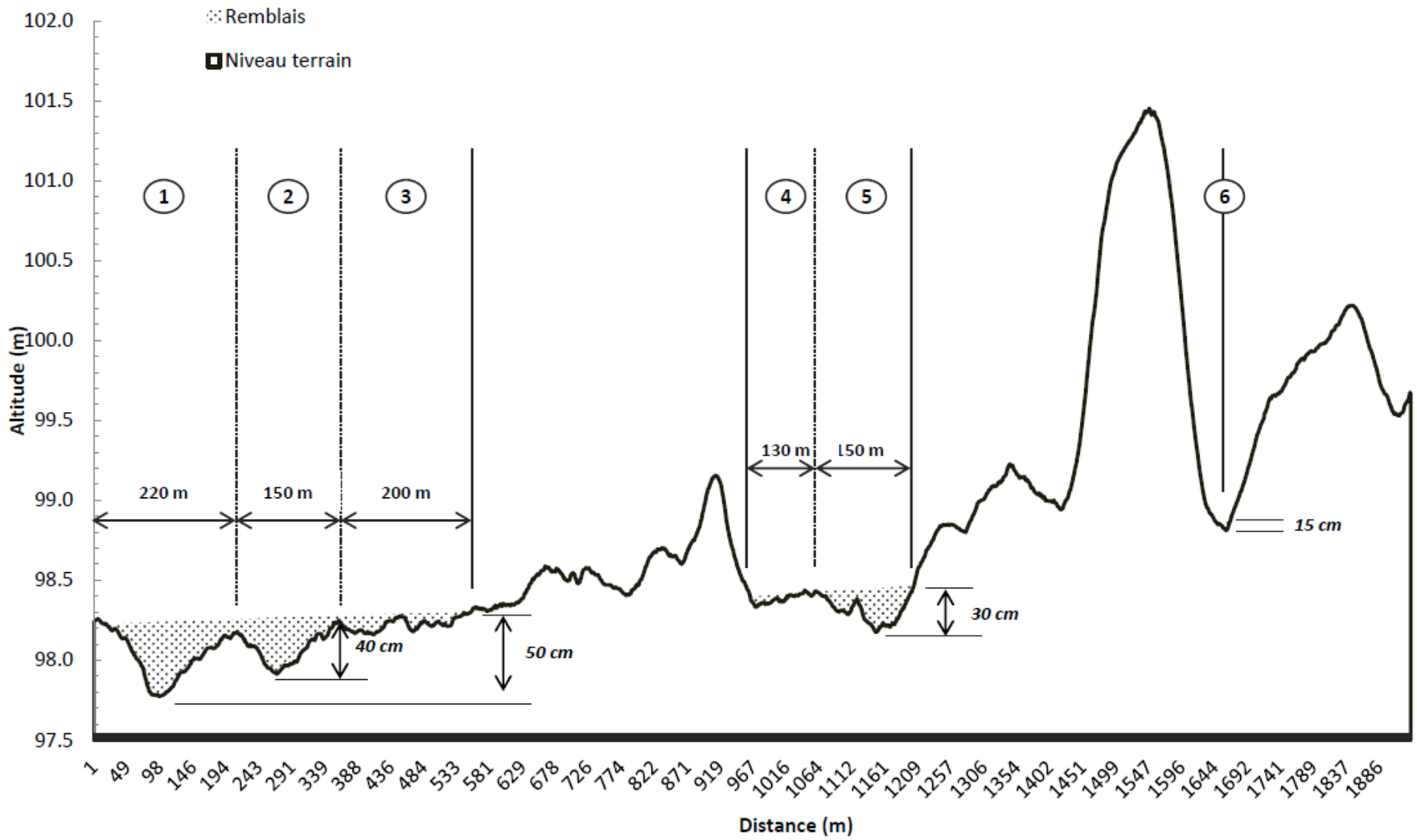


Figure 44 : Scénario de rehaussement du chemin Choinière à hauteur de 50 cm en dessous du niveau d'eau pour la récurrence 100 ans

5.1.5.1 Scenarios et coûts des travaux de rehaussement

Un ingénieur civil a été mandaté par l'INRS afin d'avoir une estimation des coûts liés aux travaux de rehaussement des rues Decelles et Choinière (le rapport livré par l'ingénieur est à l'annexe 10 du présent rapport). Deux options ont été proposées. La première option consiste à rehausser les routes en diminuant la largeur des accotements de manière proportionnelle au rehaussement. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de conserver le largueur de la route et est moins couteuse. La deuxième option consiste à élargir un côté de la route uniquement. L'avantage de cette méthode, est qu'elle permet plus de souplesse pour respecter les exigences géomorphologiques d'une route ((1) voies carrossables de 3m de large, (2) accotement de 1m de large minimum et (3) une pente de talus de 1 :1).

Les coûts des travaux pour la mise en place du scénario le moins couteux (scénario 1) s'élèvent à 154 208 $ pour la rue Decelles et 237 200 $ pour la rue Choinière, soit un total de 391 408 $ pour l'ensemble des travaux. Ce scénario a été retenu pour la simulation des modèles hydrauliques pour des raisons économiques et techniques.

5.1.5.2 Impact du rehaussement des routes sur le risque aux personnes

Une modélisation hydraulique 2D qui intègre le rehaussement des routes a été effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS. Le modèle hydraulique obtenu a permis d'évaluer l'impact de cette mesure sur le comportement hydraulique et le niveau de risque aux personnes. Ce risque est évalué à partir des données de vitesses d'écoulement et des profondeurs de submersion. Les cartes de risque pour les récurrences 2, 20 et 100 ans sont présentées respectivement dans les figures 45, 46 et 47. Chacune des figures présente deux situations, soit, à gauche, la répartition du risque à l'état actuel et, à droite, la répartition du risque après avoir rehaussé les rues Decelles et Choinière.

Après le rehaussement des routes, pour une période de retour supérieure à 2 ans, la répartition du risque reste similaire. Cependant, une modification de l'étendue du risque est observée (à droite de la rue Decelles). La route ayant été surélevée, elle agit comme barrière à l'écoulement de l'eau de l'autre côté de la route et par conséquent, la présence de risque. Pour les récurrences 20 et 100 ans, les cartes de risques avant et après le rehaussement des routes sont très similaires.

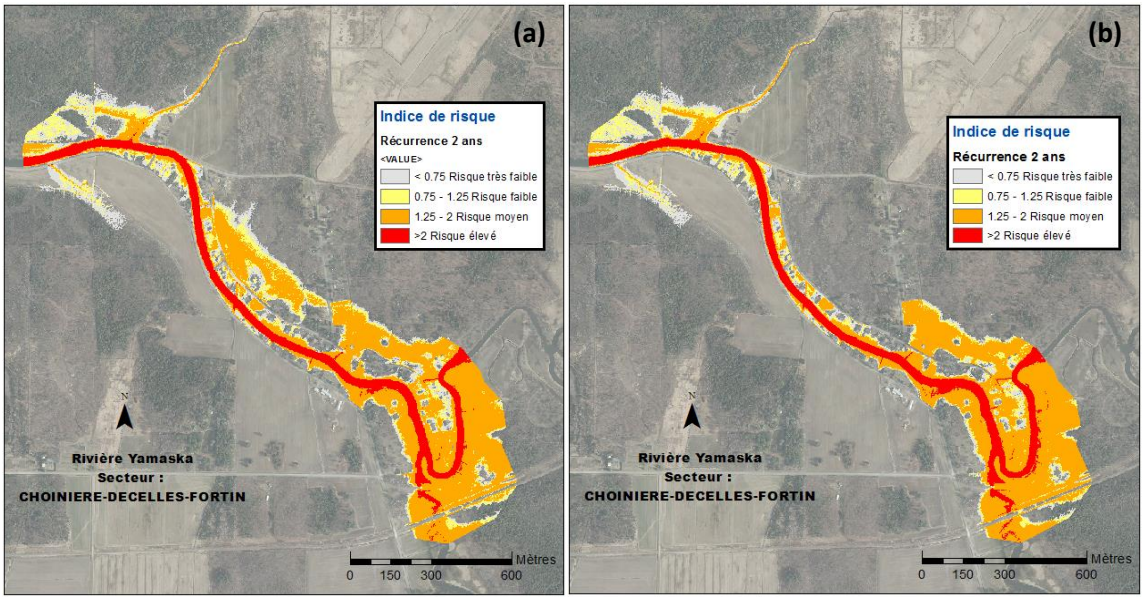


Figure 45 : Carte de risque pour la récurrence 2 ans, a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière

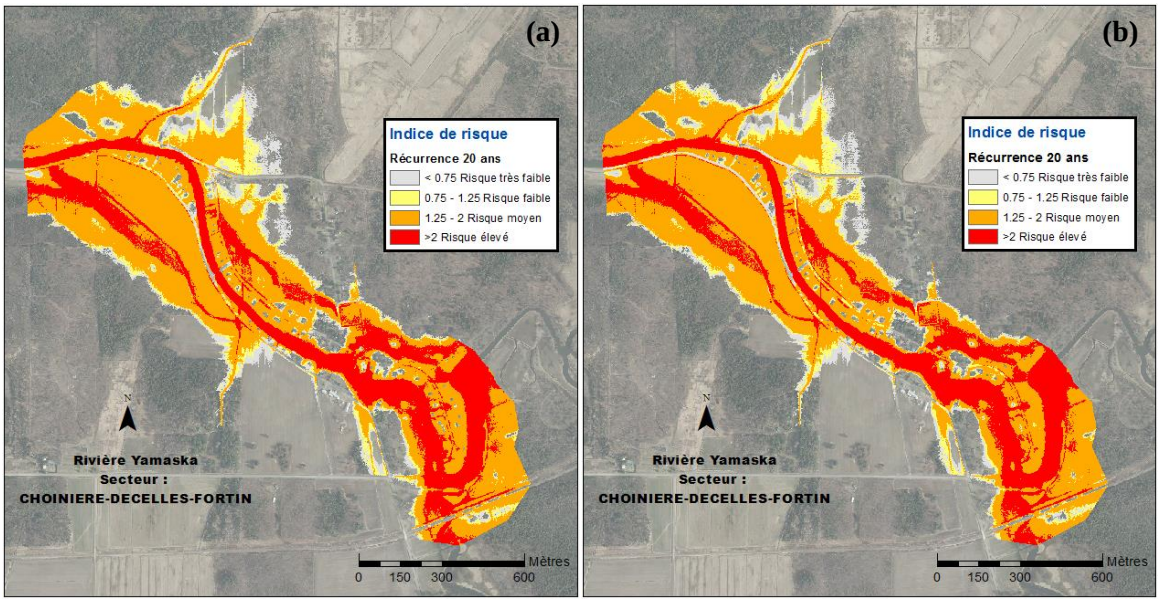


Figure 46 : Carte de risque pour la récurrence 20 ans a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière

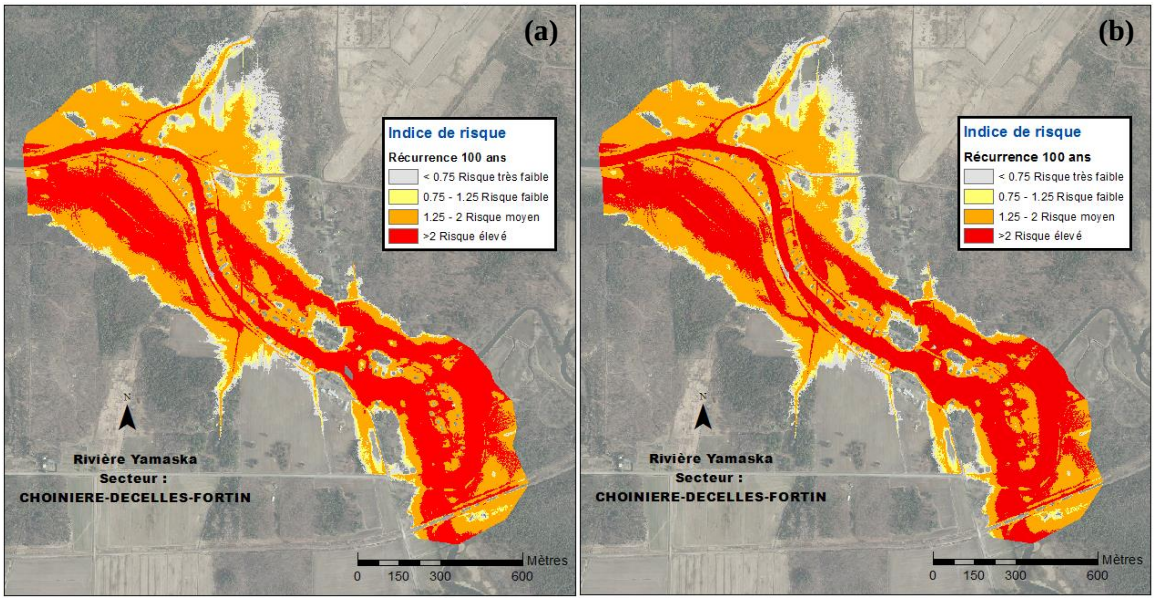


Figure 47 : Carte de risque pour la récurrence 100 ans a- avant et b- après rehaussement des routes Decelles et Choinière

5.1.5.3 Impact du rehaussement des routes sur le dommage annuel moyen

L'objectif du rehaussement de quelques portions de routes dans le secteur à l'étude était de permettre aux véhicules d'urgence d'accéder aux personnes sinistrées. Cette mesure offre alors un avantage non économique qui a un impact lié à la sécurité des personnes. Cette mesure de mitigation a toutefois entrainé l'accentuation du DAM pour les résidences principales (excluant celles situées dans le méandre) d'un montant global de 2 616 $ dans le cas du rehaussement de la rue Decelles seulement et de 7 620 $ dans le cas du rehaussement des deux routes Decelles et Choinière.

5.1.6 Analyse des résultats

Les mesures de mitigation étudiées dans le cadre de ce travail présentent des avantages sur deux niveaux. Le premier niveau concerne les aspects liés à la sécurité des personnes. Cet avantage est principalement assuré par le rehaussement de certaines sections de routes et le retrait des résidences situées dans le secteur du méandre. Le deuxième niveau a un caractère économique. Certaines mesures de mitigation, en particulier l'immunisation des résidences principales, ont pour but de réduire le DAM pour les résidences.

Le tableau ci-dessous résume les indicateurs d'analyse coûts-bénéfices pour les trois premiers scénarios de mitigation. Ce tableau montre que le scénario qui consiste à

immuniser les résidences principales (incluant le méandre) avec un DAM > 100 $ est le plus rentable à long terme (sur une durée de 50 ans) avec un VAN positif de 751 801 $ et un rapport avantage sur coût supérieur à 1 (2.04).

Tableau 27 : Rapport avantages/coûts et indice VAN pour les scénarios étudiés

Scénario	VAN	$\frac{\mathbf{A}}{\mathbf{C}}$
Rachat et retrait des résidences principales situées dans le méandre	-588 230 $	0.51
Immunisation des résidences principales	336 587 $	1.30
Immunisation des résidences principales avec un DAM > 100 $	751 801 $	2.04
Rachat et retrait des résidences principales situées dans le méandre et immunisation des bâtiments	-582 416 $	0.71
Rachat et retrait des résidences principales situées dans le méandre et immunisation des bâtiments avec un DAM > 100 $	-218 584 $	0.87

5.2 Évaluation des coûts d'outils de planification et de mesures de prévention

5.2.1 Mise à jour de la cartographie des zones inondables

Afin de simuler l'impact de la mise en place d'une mesure de mitigation (ex. rehaussement d'une route dans le cas du présent projet) sur la dynamique de l'écoulement d'eau ainsi que son niveau, une mise à jour de la cartographie des zones inondables est nécessaire. Cette mise à jour consiste principalement à modifier le modèle numérique de terrain selon la géométrie de l'élément à intégrer et de relancer le modèle hydraulique en tenant compte de cette modification. Cette procédure requiert l'intervention d'une ressource qui maitrise la modélisation hydraulique et pourrait être réalisée sur une période de 3 à 5 jours à temps plein. Le logiciel de modélisation hydraulique étant gratuit, les coûts nécessaires pour la réalisation de cette mise à jour peuvent varier entre 1 200 et 2 000 $.

5.2.2 Mise en place d'un système d'alerte précoce

La mise en place d'un système d'alerte pour le secteur étudié nécessite tout d'abord une période de calibration. Cette dernière nécessite l'installation d'un lecteur de niveau sur une échelle limnimétrique afin d'estimer le décalage horaire entre le débit à la station de

traitement d'eau potable à Bromont et celui à Brigham. L'estimation de ce décalage permettra le déclenchement d'alertes précoces.

Le débit estimé dans le secteur étudié est converti en niveau d'eau et en étendue de plaines inondables en se basant sur la méthode Cadyri développée à l'INRS. La cartographie obtenue permet de localiser les résidences inondées ou isolées ainsi que les routes coupées. Cette information pourrait être envoyée aux résidents par un message texte (SMS) ou par courriel.

L'estimation des coûts associés à la mise en place du système d'alerte est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 28 : Estimation des coûts de mise en place d'un système d'alerte à Brigham

Activité	Coût
Coûts de mise en place	
Calibration	
Enregistreur de niveau d'eau	
Mise en place de l'enregistreur de façon temporaire	
Récupération des données	**7 888.00 $**
Retrait des installations	
Déplacements (location voiture + essence)	
Analyse des données	
Développement	
Mise en place de la base de données	**5 880.00 $**
Mise en place d'une passerelle avec CEHQ	
Implémentation	**392.00 $**
Licence Cadyri	**1 000.00 $**
Total	**15 160.00 $**
Total pondéré (Taux de majoration provincial 1.5)	**22 740.00 $**
Coûts de fonctionnement (par an)	
Communication	
Envoi des SMS	**240.00 $**
Envoi des courriels	
Mise à jour des bases de données	**784.00 $**
Total	**1 024.00 $**
Total pondéré (Taux de majoration provincial 1.5)	**1 536.00 $**

5.2.3 Conception de repères de crue

Une entreprise spécialisée dans le design et le graphisme a été mandatée par l'INRS pour la conception d'un repère de crue qui permet de figurer les hauteurs d'eau, leurs récurrences, ainsi que les cartes de zones inondables pour chaque récurrence. Le concept général du repère de crue proposé est illustré dans la figure ci-dessous. Le coût de sa réalisation s'élève à 17 472 $ (le rapport livré dans le cadre de ce mandat est à l'annexe 11 du présent rapport).

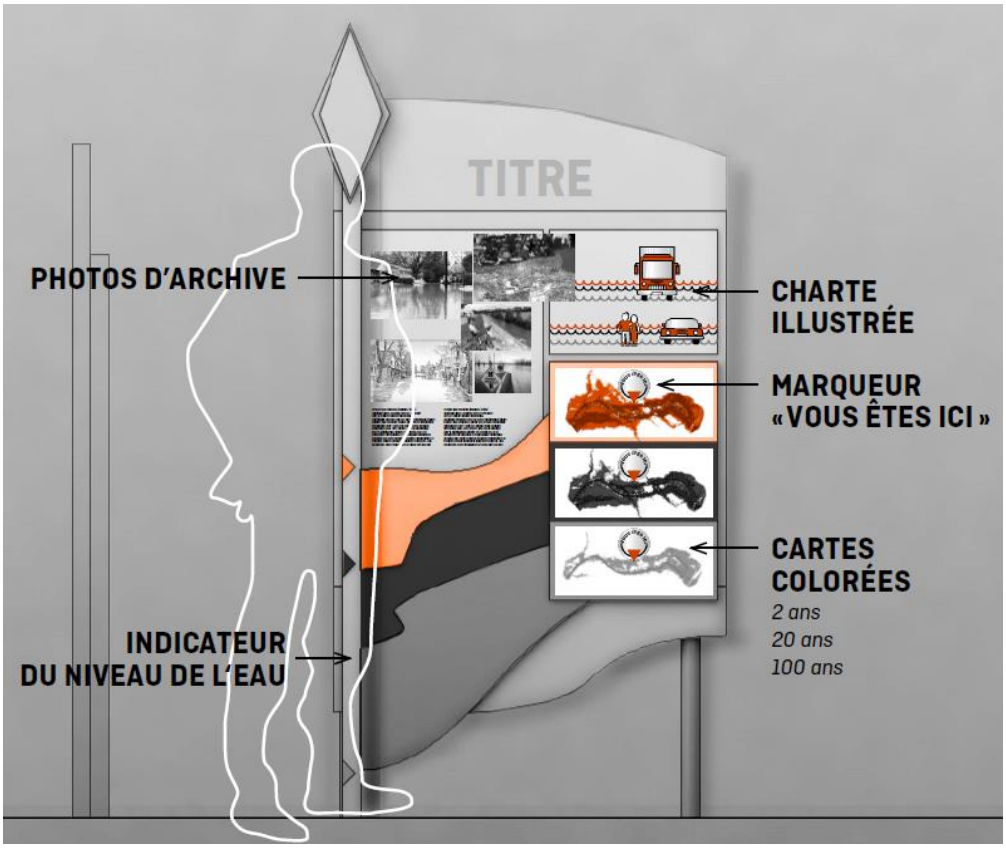


Figure 48 : Concept général du repère de crue proposé

Le repère de crue proposé sera installé dans 3 endroits différents dans le secteur étudié (voir figure ci-dessous).

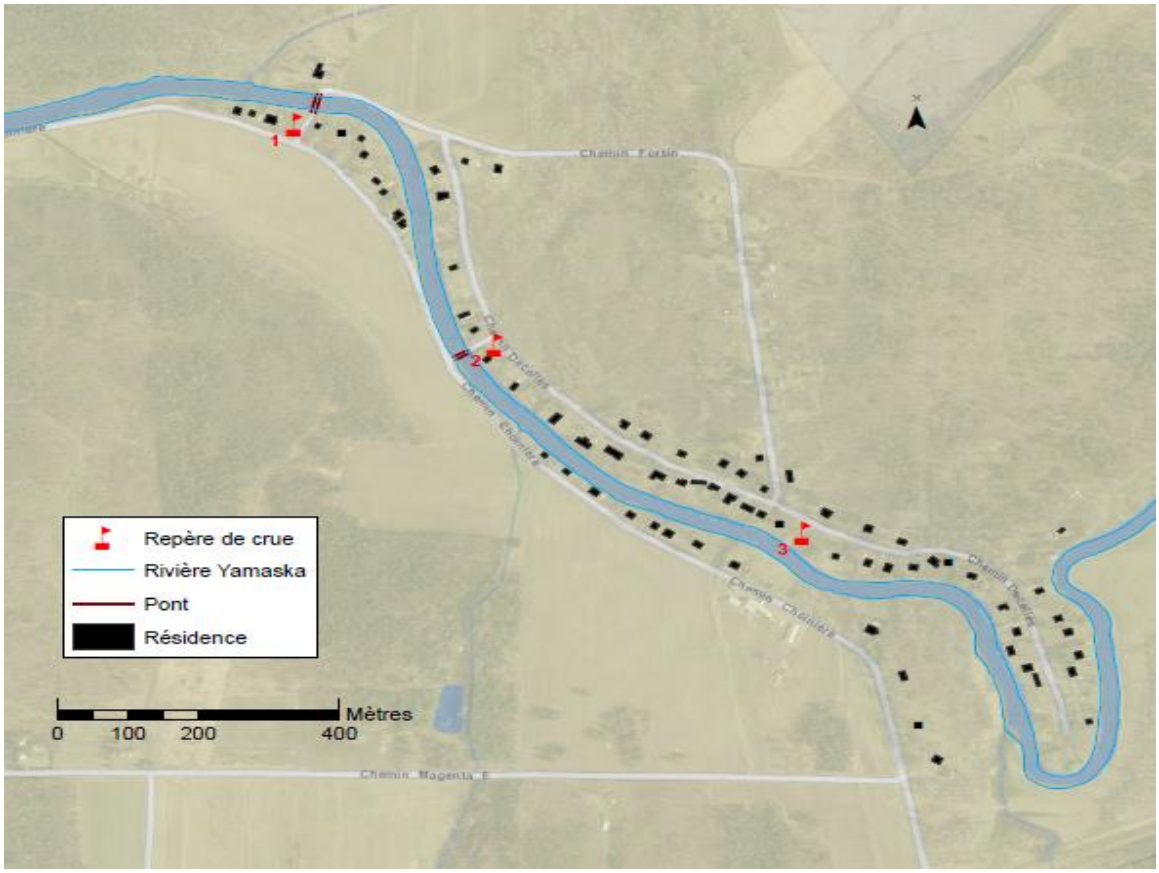


Figure 49 : Endroits proposés pour l'installation des repères de crue

6 Impact des changements climatiques sur le risque d'inondations

Dans la présente section, une étude préliminaire de l'impact des changements climatiques sur le niveau du risque d'inondation a été réalisée. Pour ce faire, les données de prévision de débits futurs établies par la direction de l'expertise hydrique (DEH) du MDDELCC ont été utilisées. Ces données présentent les débits maximaux annuels en aval du secteur à l'étude pour les récurrences 2 et 20 ans pour les horizons 2030, 2050 et 2080. Deux scénarios de forçage radiatif ont été simulés soit RCP4.5 et RCP8.5. Le tableau ci-dessous résume les données fournies par le DEH. Il est à noter que les valeurs de débit de référence qui correspondent à l'état actuel sont différentes de celles qui figurent dans le rapport du PDCC associé au secteur à l'étude (81.3 m^3/s pour la récurrence 2 ans et 163.7 m^3/s pour la récurrence 20 ans). Pour l'évaluation des dommages pour les évènements futurs les débits de références fournis par le DEH ont été utilisés.

Tableau 29 : Impact des scénarios de changement climatique sur le débit de la rivière Yamaska en aval du secteur à l'étude

	Référence	Horizon 2030		Horizon 2050		Horizon 2080	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Débit de récurrence 2 ans (m^3/s)	60.6	56.1	56.2	54.7	53.5	53.7	48.0
Débit de récurrence 20 ans (m^3/s)	103.3	98.2	99.9	98.2	95.8	96.6	89.6

Selon la figure ci-dessous qui représente les valeurs du tableau 29, les débits de récurrences 2 et 20 ans ont tendance à baisser sur les 60 ans prochaines années pour les deux scénarios de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5).

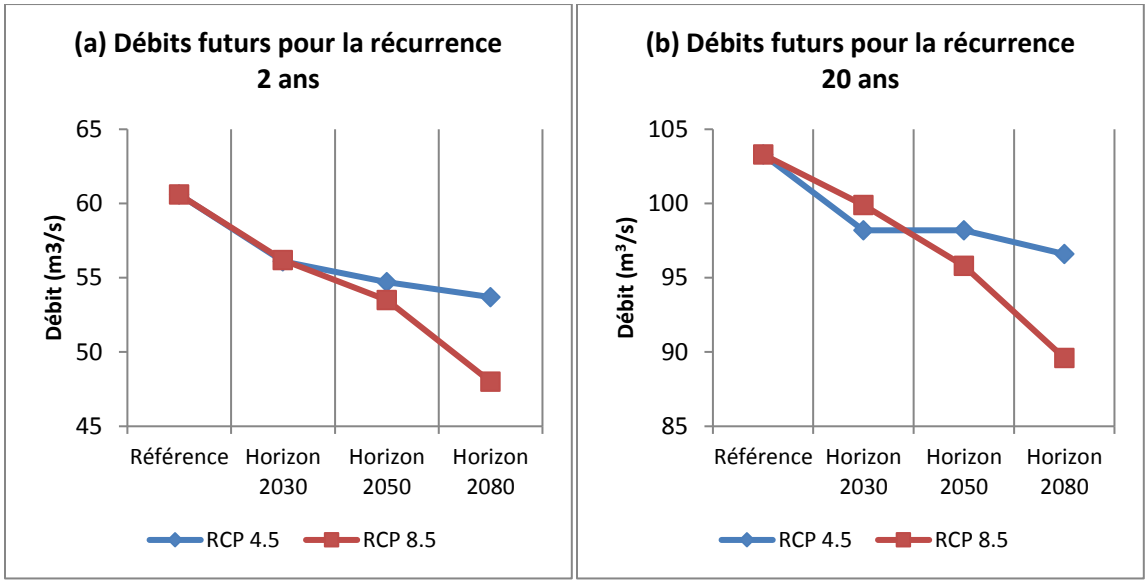


Figure 50 : débits futurs pour les récurrences : (a) 2 ans et (b) 20 ans

Les dommages causés pour les évènements associés aux récurrences 2 et 20 ans pour les scénarios futurs ont été évalués. Pour ce faire, la valeur moyenne de débit des deux scénarios de forçage radiatif (RCP4.5 et RCP8.5) a été utilisée. Les dommages associés aux évènements futurs (voir tableau ci-dessous) suivent une tendance décroissante similaire à celle des débits futurs.

Tableau 30: dommage associé aux récurrences 2 et 20 ans pour les débits futurs : 2030, 2050 et 2080

Récurrence	**Récurrence 2 ans**				**Récurrence 20 ans**			
Année	**Référence**	**2030**	**2050**	**2080**	**Référence**	**2030**	**2050**	**2080**
Débit (m^3/s)	60.6	56.2	54.1	50.9	103.3	99.1	97.0	93.1
Dommage (%)	0.6%	0.5%	0.5%	0.5%	7.4%	7.0%	6.8%	6.5%
Dommage ($)	845 $	671 $	658 $	646 $	8 978 $	8 550 $	8 312 $	7 859 $

7 Conclusion

Afin d'améliorer la connaissance du risque liés aux inondations dans le secteur Decelles-Choinière-Fortin de la municipalité de Brigham, différents volets ont été abordés. En premier lieu, une méthodologie d'évaluation du dommage annuel moyen causé par les inondations a été établie. Ensuite, un portrait historique des évènements d'inondations a été dressé. Ce dernier s'est basé sur les données du MSP liées à l'indemnisation des citoyens sinistrés et sur des informations issues du questionnaire réalisé auprès des citoyens. Le dommage annuel moyen basé sur une modélisation hydraulique 2D a été réalisé afin de déterminer le niveau de risque économique associé à chaque résidence et de définir les zones les plus à risque dans le secteur étudié. Le secteur du méandre a été identifié comme le plus problématique. Ce secteur subit environ le tiers des dommages malgré qu'il représente seulement 10% des résidences du secteur étudié. L'étude du risque aux personnes et véhicules qui se base sur la profondeur d'eau et la vitesse d'écoulement a montré également que le secteur du méandre est le plus exposé au risque d'inondation notamment à cause de la profondeur d'eau élevé par rapport aux autres secteurs et du fait que la seule voie de sortie (la rue Decelles) est coupée.

En se basant sur l'étude du risque, certaines mesures de mitigation et de gestion du risque d'inondation ont été étudiées. Ces mesures présentent plusieurs avantages en lien avec la sécurité des personnes (ex. rehaussement des rues publiques, retrait des résidences situées dans le méandre...), la rentabilité économique (ex. immunisation des résidences) et la résilience contre le risque d'inondations (ex. système d'alerte précoce, repères de crue).

8 BIBLIOGRAPHIE

Bladé E. et al. (2012). Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels. Advances in Water Resources 42. 17–29

Bonnifait L., Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois, mémoire de maîtrise, 2005

Centre d'expertise hydrique (CEHQ), Programme de détermination des cotes de crues, rivière Yamaska, Municipalité de Brigham (secteur d'Adamsville), 2004.

Lamari M., Bouchard J., Anstett É., Analyse d'impact réglementaire (AIR), Balises méthodologiques pour mieux évaluer les réglementations, Presses de l'Université du Québec, 2015.

Penning-Rowsell, E., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S., Viavattene, C., & Owen, D. (2013). Flood and coastal erosion risk management: a manual for economic appraisal. Routledge

Quiroga V. Moya et al. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5. RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua 3. 25–33

Simard I., 2015, Infrastructures à risque face aux inondations et à l'érosion côtières pour la municipalité régionale de Grand Tracadie-Sheila, Nouveau-Brunswick

Surendran S., Gibbs G., Wade S., Udale-Clarke H. (2008), SUPPLEMENTARY NOTE ON FLOOD HAZARD RATINGS AND THRESHOLDS FOR DEVELOPMENT PLANNING AND CONTROL PURPOSE – Clarification of the Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321/TR1.

US Army Corps of Engeneers, USACE (2016). HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's manual version 5.0, David, California

Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., DesJarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C., & Uhde, S. (2008). L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques. Ouranos.

ANNEXE 1 : LOCALISATION DES SECTIONS TRANSVERSALES

Tableau 31 : Position GPS des sections transversales_Yamaska, secteur Brigham (Système de coordonnée géographique : GCS_North American_1983)

ID	Campagne 2000		Campagne 2016	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
90	363878.3376	5015189.24	363928.075	5015240.182
89	363765.1907	5015119.026	363771.573	5015101.14
88.5	-	-	363837.887	5014964.849
88	363746.1762	5014750.3	-	-
87	363639.1163	5015077.202	363653.271	5014957.844
86.6	363575.6471	5015102.283	-	-
86.3	363507.8359	5015120.759	363513.145	5015065.961
86	363440.3637	5015139.617	363415.074	5015113.668
85	363261.2829	5015203.629	-	-
84	363051.3172	5015320.742	363034.639	5015322.306
83	362918.6358	5015455.131	-	-
82	362917.5628	5015484.1	362910.208	5015468.781
81	362915.0892	5015490.276	362919.965	5015500.827
80	362885.886	5015510.577	362901.296	5015554.541
79	362873.3642	5015698.523	-	-
78	362723.0349	5015891.618	362743.397	5015909.542
77	362694.7294	5015866.686	362719.127	5015910.359
76	362689.9338	5015865.998	362690.425	5015915.423
75	362679.2928	5015909.753	362662.106	5015921.613
74	362484.4026	5015882.225	362482.797	5015937.578
73	362209.6086	5015866.677	362143.648	5015875.477

ANNEXE 2: DESCRIPTION DU SUBSTRAT DES PLAINES

ID	Description du substrat	Manning's n value
0	**Pas de données**	
100	**Plantes herbacées**: Plantes vasculaires sans tige ligneuse (graminées, herbacées latifoliées ou graminoïdes, et plantes cultivées); la couverture végétale est d'au moins 20 % ou au moins le tiers de la végétation totale est constitué de plantes herbacées.	0.09
20	**Eau**: Lacs, réservoirs, fleuves, rivières, ruisseaux, étendues d'eau salée.	0.03
211	**Conifère – dense**: La fermeture du couvert est supérieure à 60 %; au moins 75 % de la surface terrière totale est occupée par des arbres du groupe des conifères	0.075
221	**Feuillu – dense**: La fermeture du couvert est supérieure à 60 %; au moins 75 % de la surface terrière totale est occupée par des arbres feuillus	0.15
222	**Feuillu – ouvert**: La fermeture du couvert est de 26 à 60 %; au moins 75 % de la surface terrière totale est occupée par des arbres feuillus	0.085
231	**Mixte – dense**: La fermeture du couvert est supérieure à 60 %; aucun des deux grands types d'arbres (conifères et feuillus) n'occupe 75 % ou plus de la surface terrière totale.	0.11
232	**Mixte – ouvert**: La fermeture du couvert est de 26 à 60 %; aucun des deux grands types d'arbres (conifères et feuillus) n'occupe 75 % ou plus de la surface terrière totale.	0.08
33	**Terrain découvert**: Sédiments fluviatiles, sols nus, sédiments d'étang ou de lac, bords de réservoir, plages, dépôts transitoires, zones incendiées, chaussées, sédiments littoraux, berges érodées, moraines, gravières, aires de résidus miniers, chemins de fer, bâtiments et aires de stationnement et autres surfaces sans végétation.	0.025
51	**Grands arbustes**: La couverture végétale est d'au moins 20 % et se compose d'au moins un tiers d'arbustes et d'arbrisseaux dont la hauteur moyenne est égale ou supérieure à 2 m	0.075
52	**Petits arbustes**: La couverture végétale est d'au moins 20 % et se compose d'au moins un tiers d'arbustes et d'arbrisseaux dont la hauteur moyenne est inférieure à 2 m.	0.07
83	**Zone humide – herbacée**: La nappe phréatique demeure près ou au-dessus de la surface du sol assez longtemps pour induire des processus liés aux milieux aquatiques ou humides; la majeure partie de la végétation est herbacée	0.065

ANNEXE 3 : INVENTAIRE DES BÂTIMENTS

Tableau 32 : Liste des résidences identifiées sur le secteur à l'étude

Numéro civique	Voie publique	Valeur bâtiment	Nombre d'étages	Présence de sous-sol	Type de résidence
1	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
2	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
3	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
4	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
5	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
6	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
7	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
8	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
9	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
10	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
11	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
12	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
13-14	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
15	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
16	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
17	chemin CHOINIERE	Non publique	2	Non publique	Non publique
18	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
19	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
20	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
21	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
22	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
23	chemin CHOINIERE	Non publique	2	Non publique	Non publique
24	chemin CHOINIERE	Non publique	1	Non publique	Non publique
1	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
2	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
3	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
4	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
5	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
6	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
7	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
8	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
9	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
10	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
11	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
12	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
13	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
14	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique

15	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
16	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
17	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
18	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
19	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
20	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
21	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
22	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
23	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
24	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
25	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
26	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
27	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
28	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
29	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
30	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
31	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
32	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
33	rue DECELLES	Non publique	2	Non publique	Non publique
34	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
35	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
36	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
37	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
38	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
39	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
40	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
41	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
42	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
43	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
44	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
45	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
46	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
47	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
48	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
49	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
50	rue DECELLES	Non publique	1	Non publique	Non publique
1	rue FORTIN	Non publique	1	Non publique	Non publique
2	rue FORTIN	Non publique	2	Non publique	Non publique
3	rue FORTIN	Non publique	1	Non publique	Non publique
4	rue FORTIN	Non publique	1	Non publique	Non publique
5	rue FORTIN	Non publique	1	Non publique	Non publique
6	rue FORTIN	Non publique	1	Non publique	Non publique

ANNEXE 4 : HAUTEUR DU PREMIER PLANCHER

Tableau 33 : Hauteur du premier plancher pour les résidences principales

Note : Ce tableau n'est pas disponible au public puisqu'il contient des renseignements personnels.

ANNEXE 5 : CARTES DES PROFONDEURS D'EAU

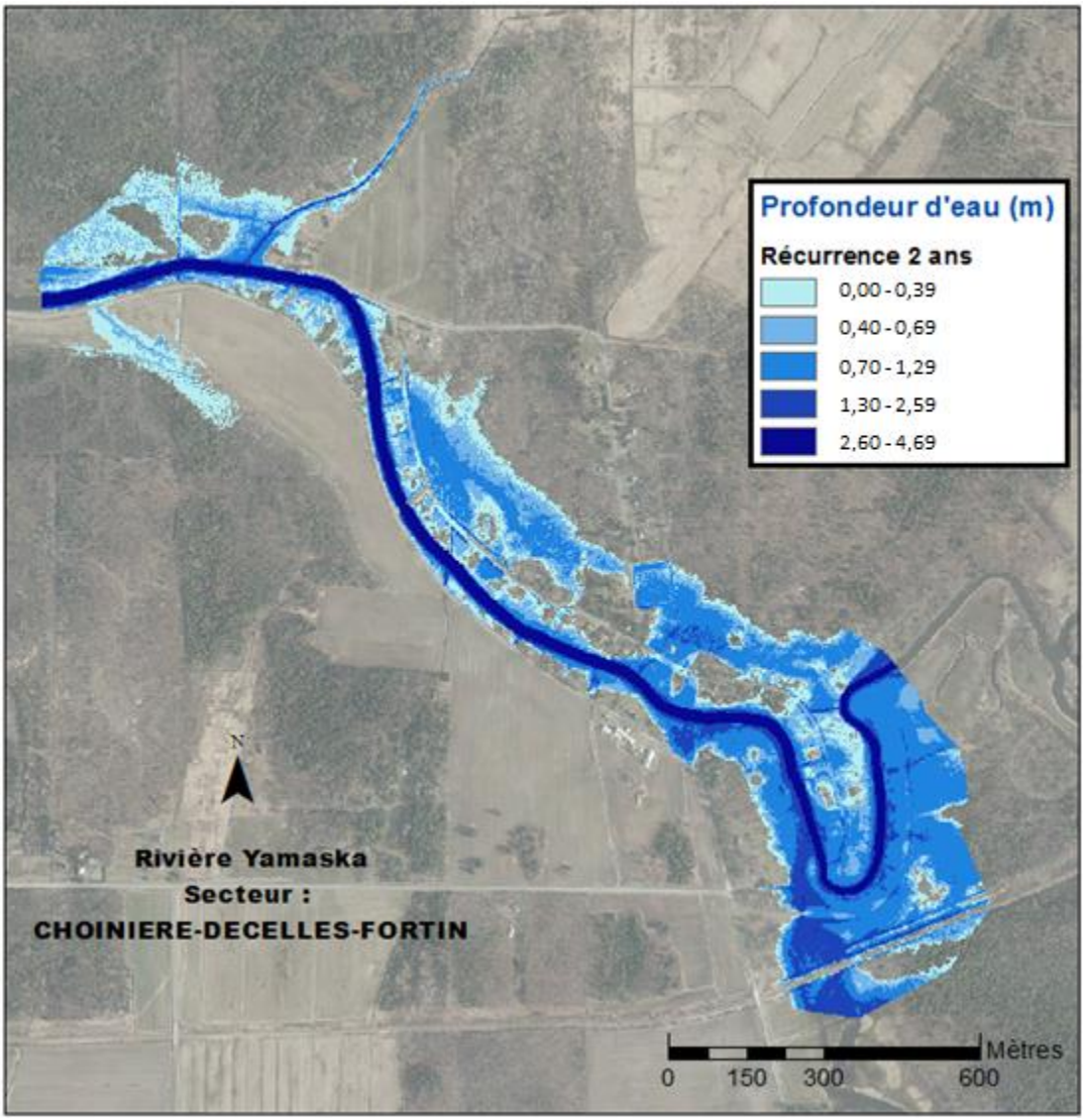


Figure 51 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 2 ans

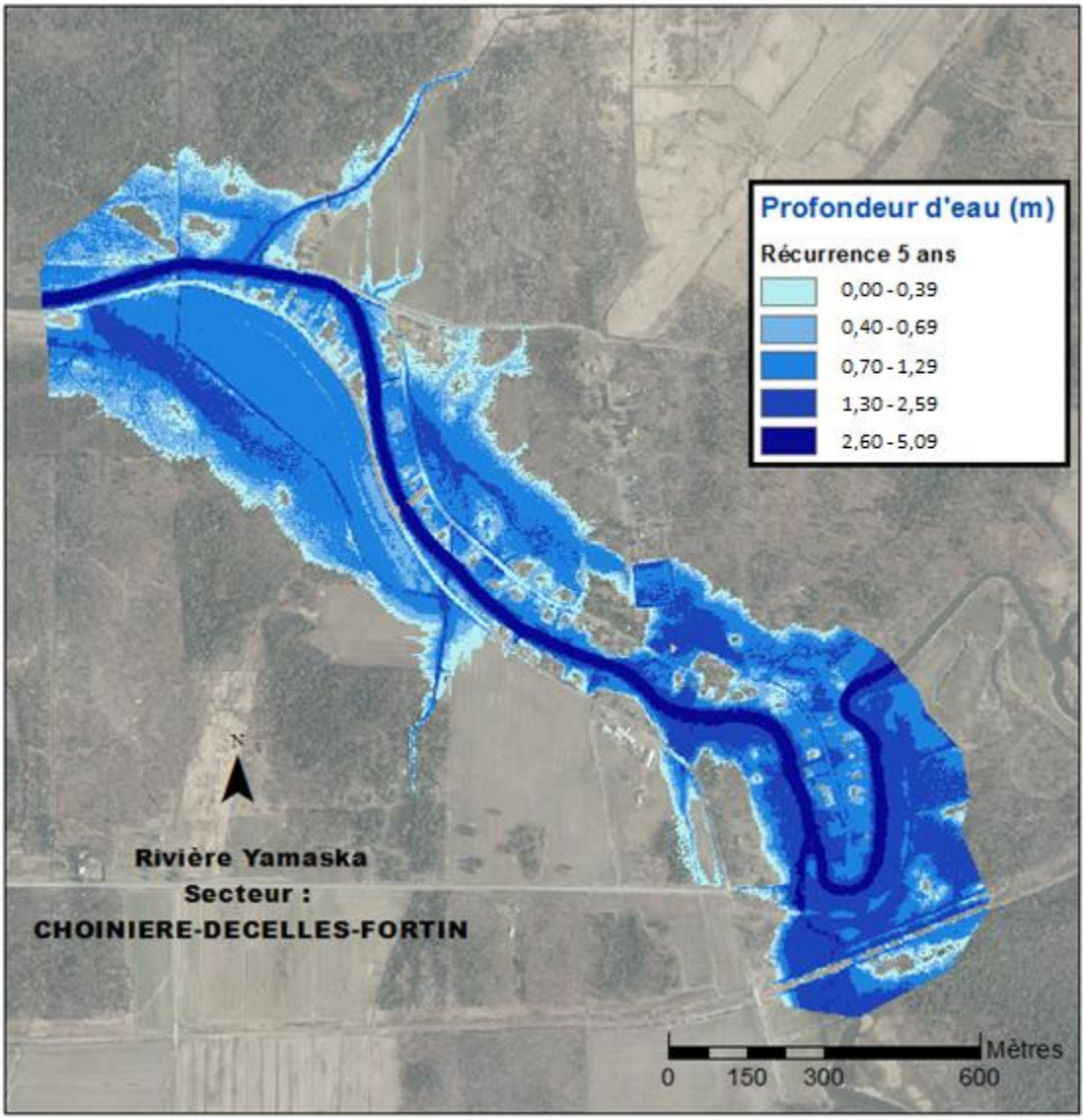


Figure 52 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 5 ans

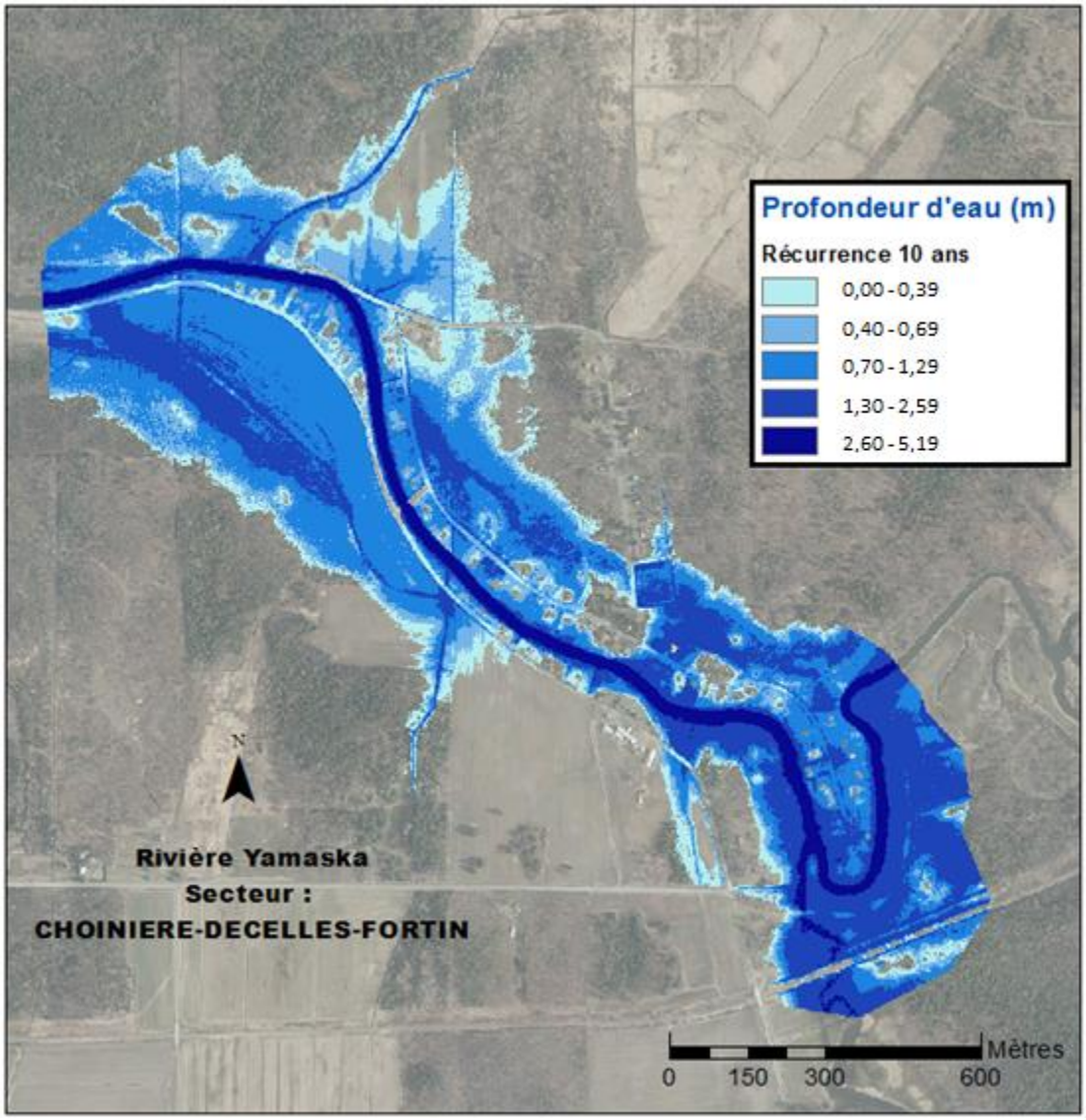


Figure 53 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 10 ans

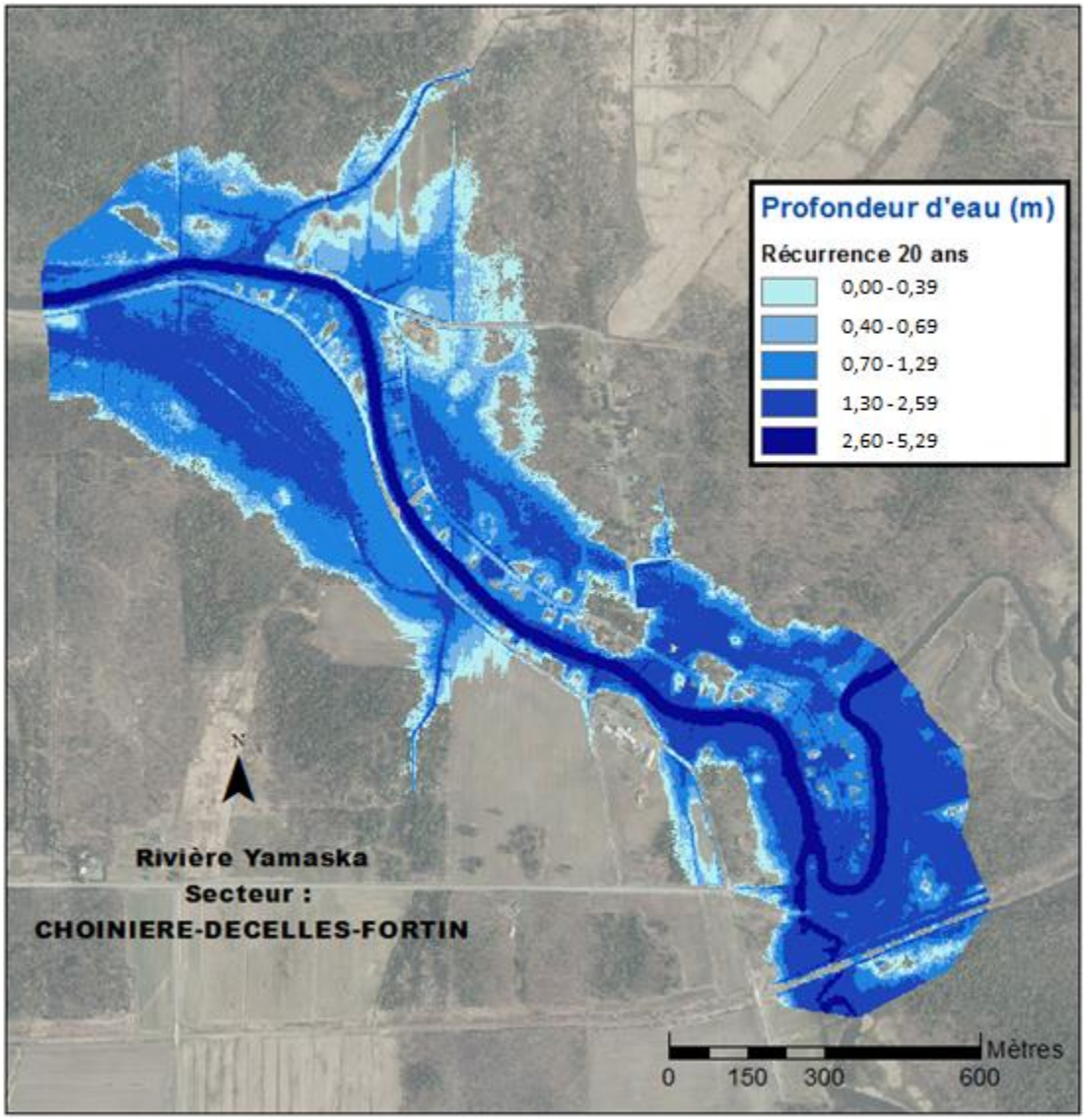


Figure 54 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 20 ans

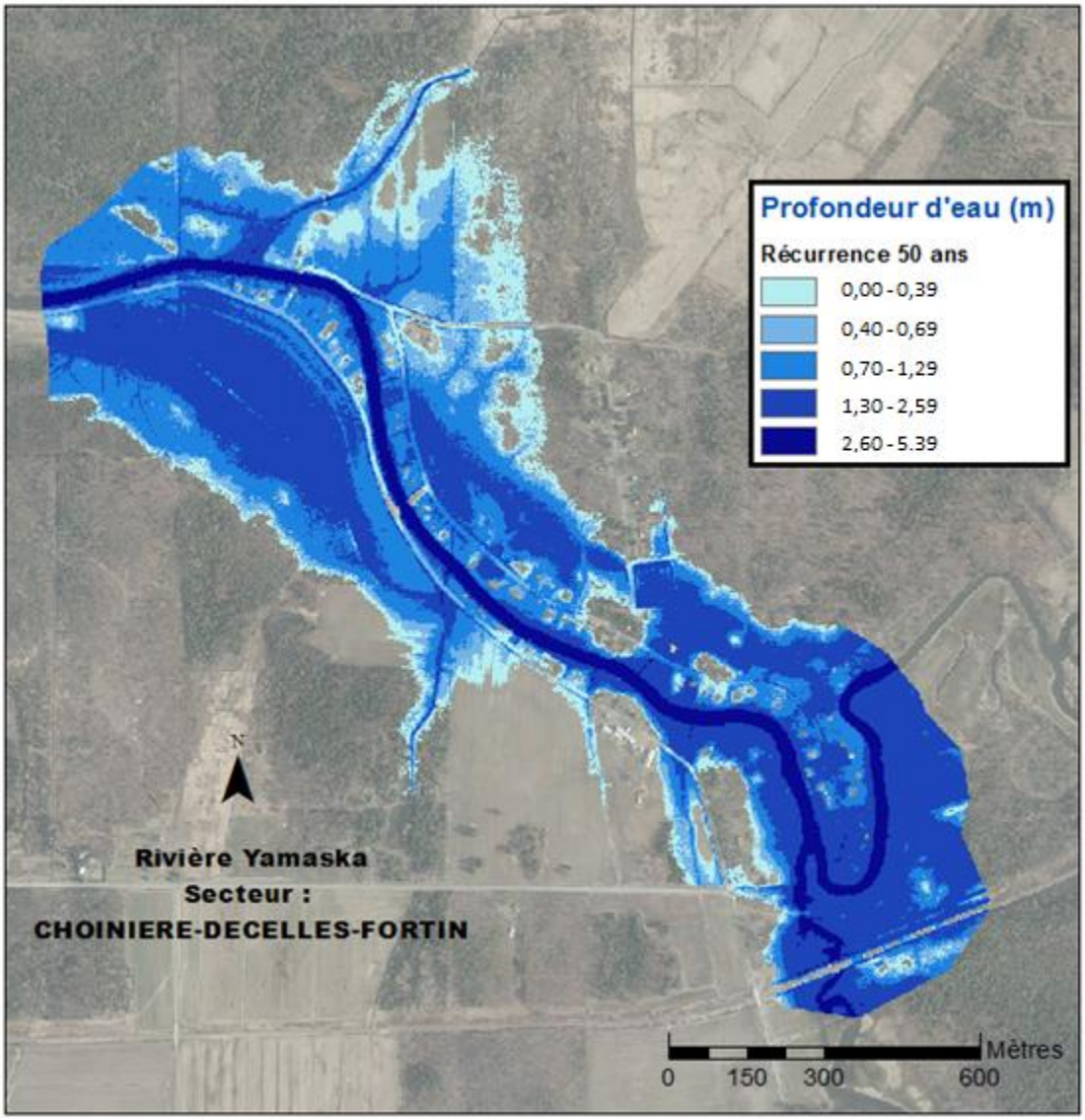


Figure 55 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 50 ans

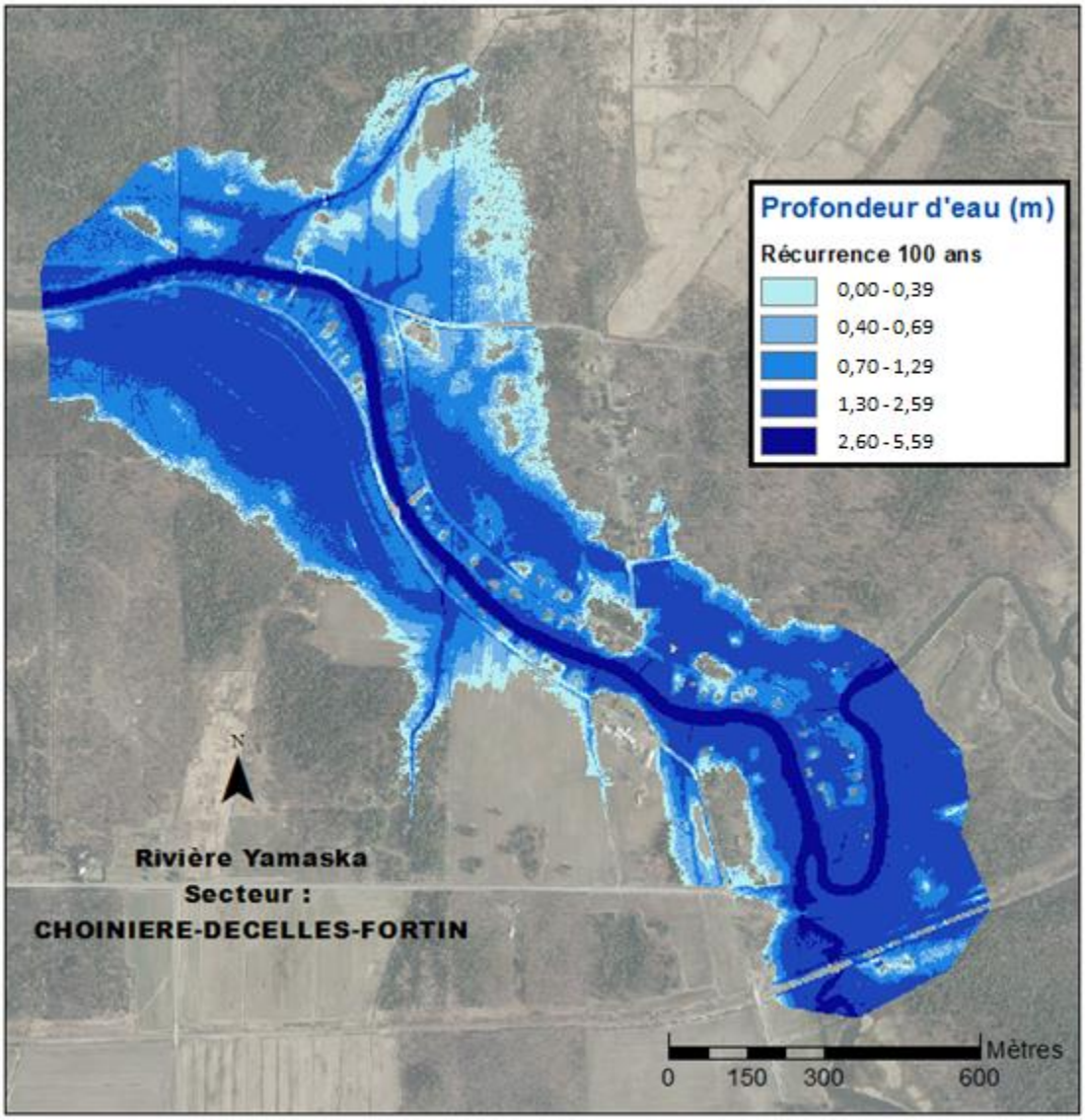


Figure 56 : Carte de profondeur d'eau pour la récurrence 100 ans

ANNEXE 6 : CARTES DES VITESSES D'ECOULEMENT

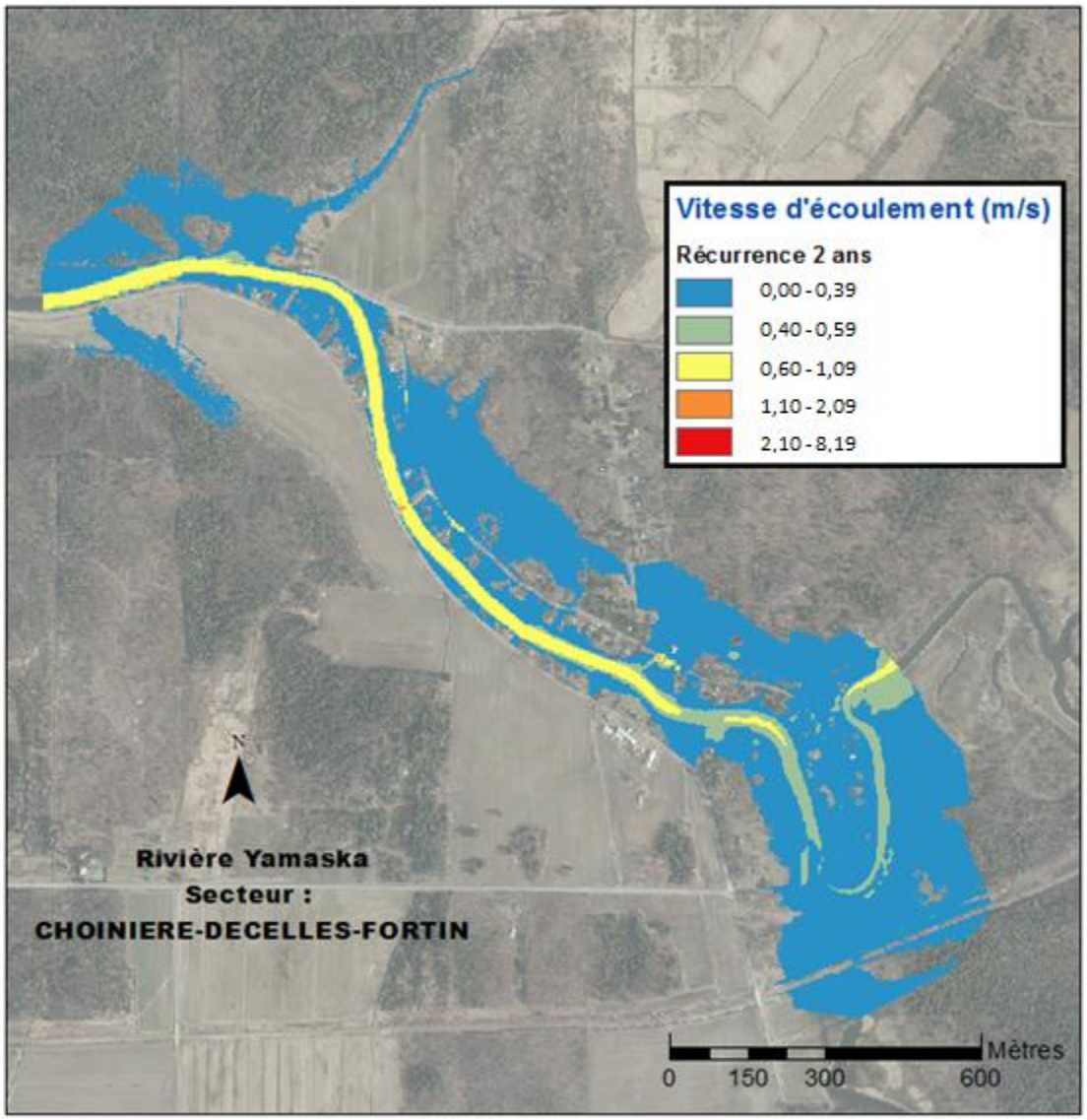


Figure 57 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 2 ans

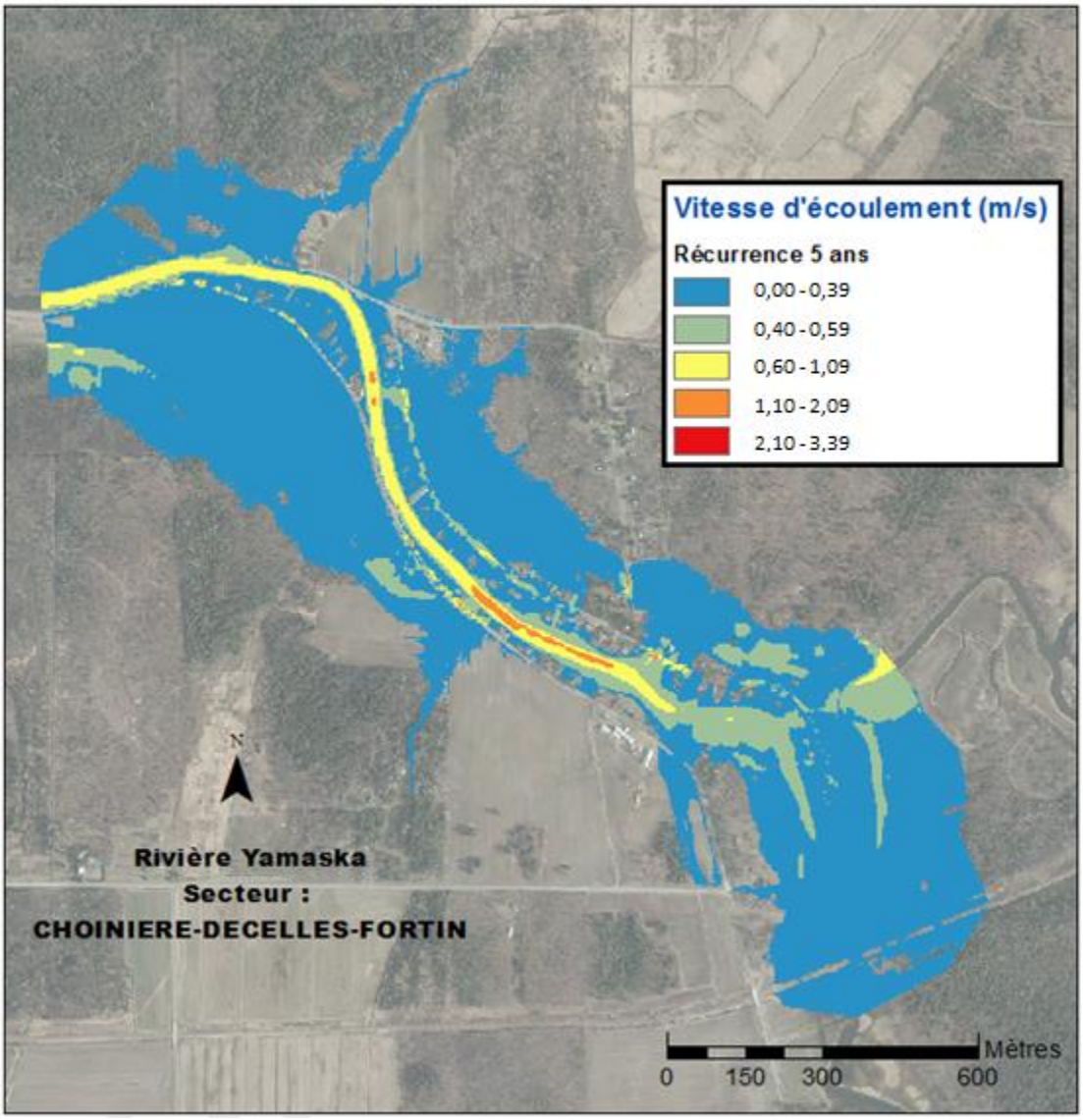


Figure 58 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 5 ans

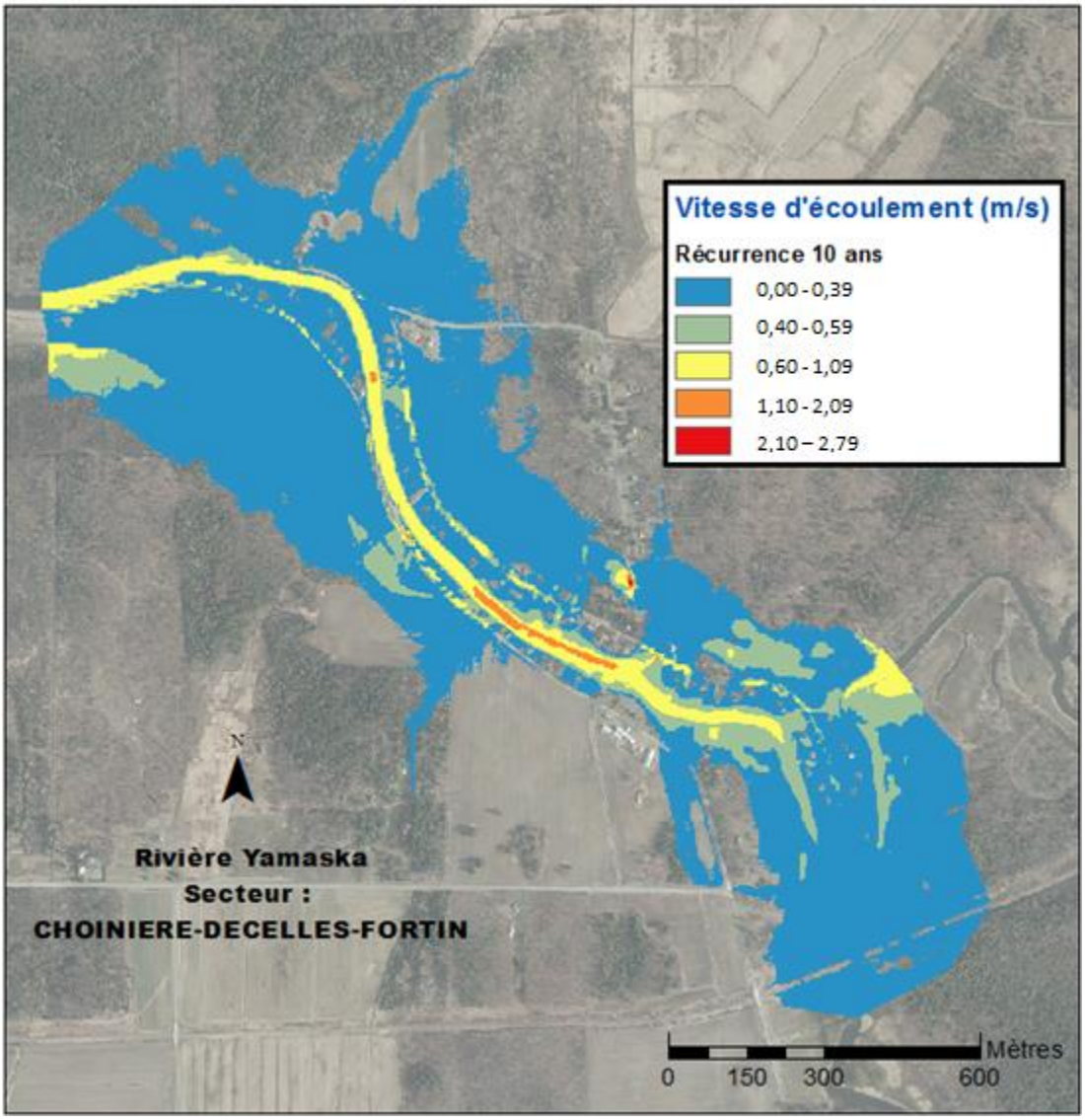


Figure 59 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 10 ans

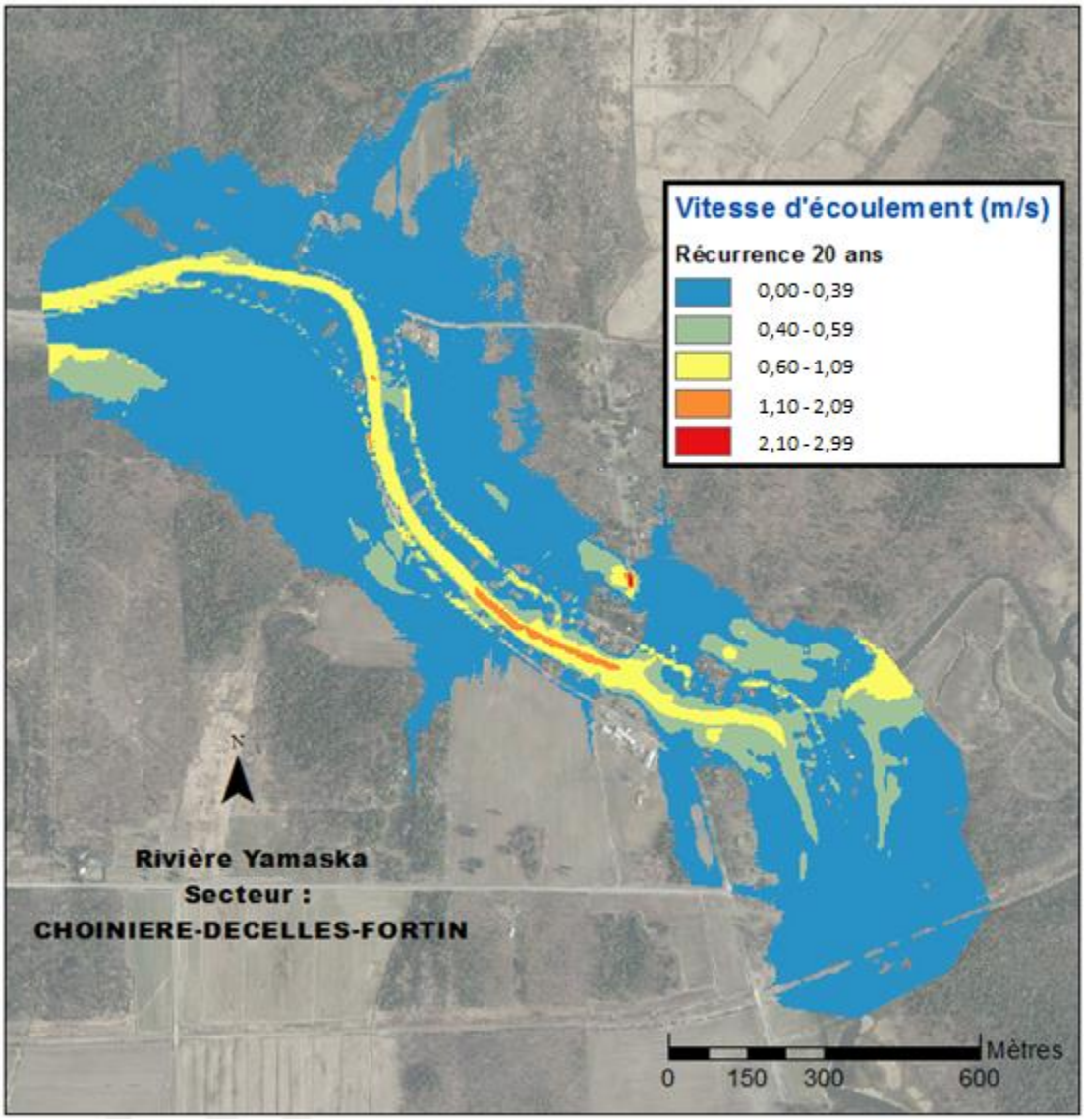


Figure 60 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 20 ans

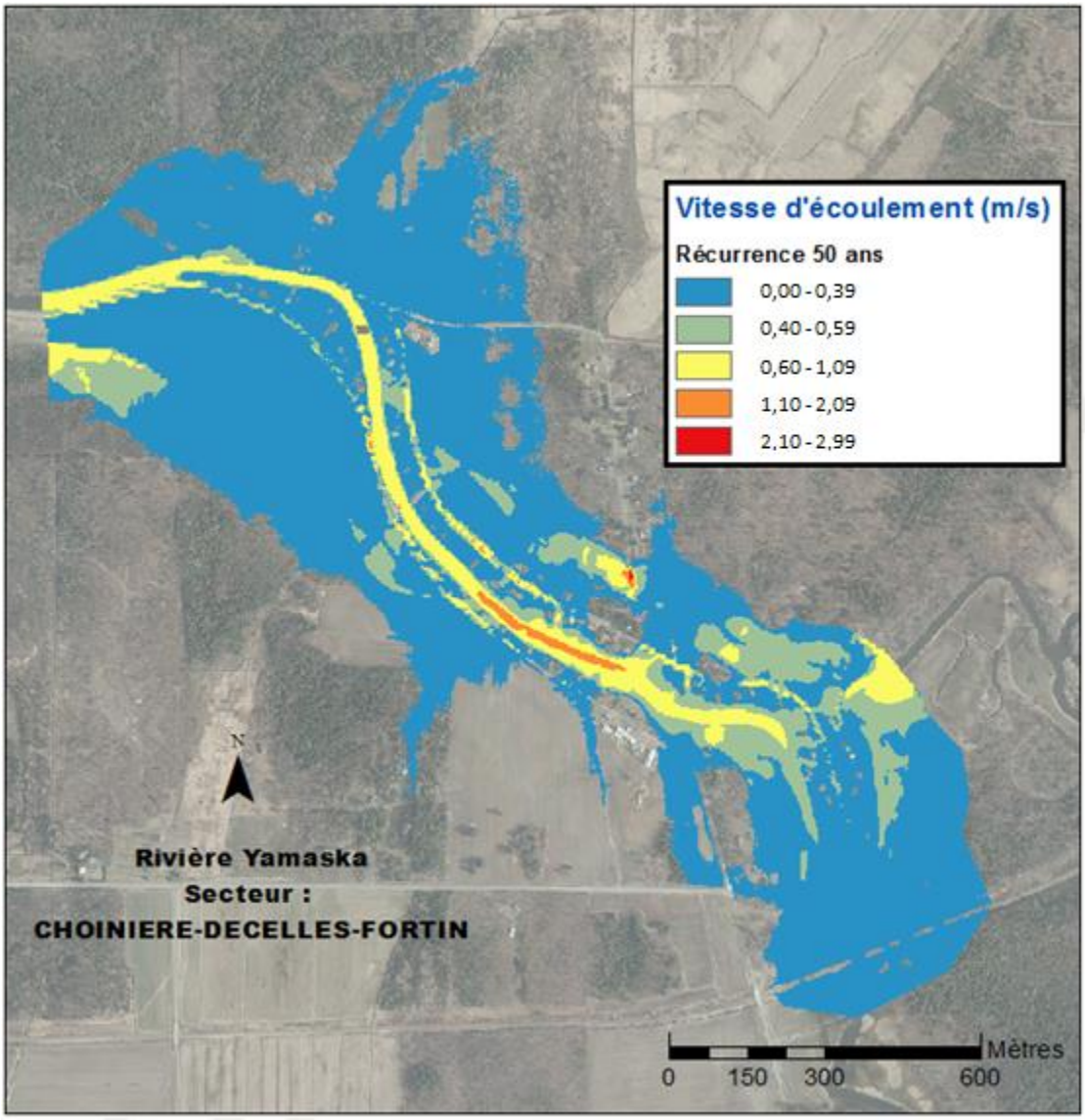


Figure 61 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 50 ans

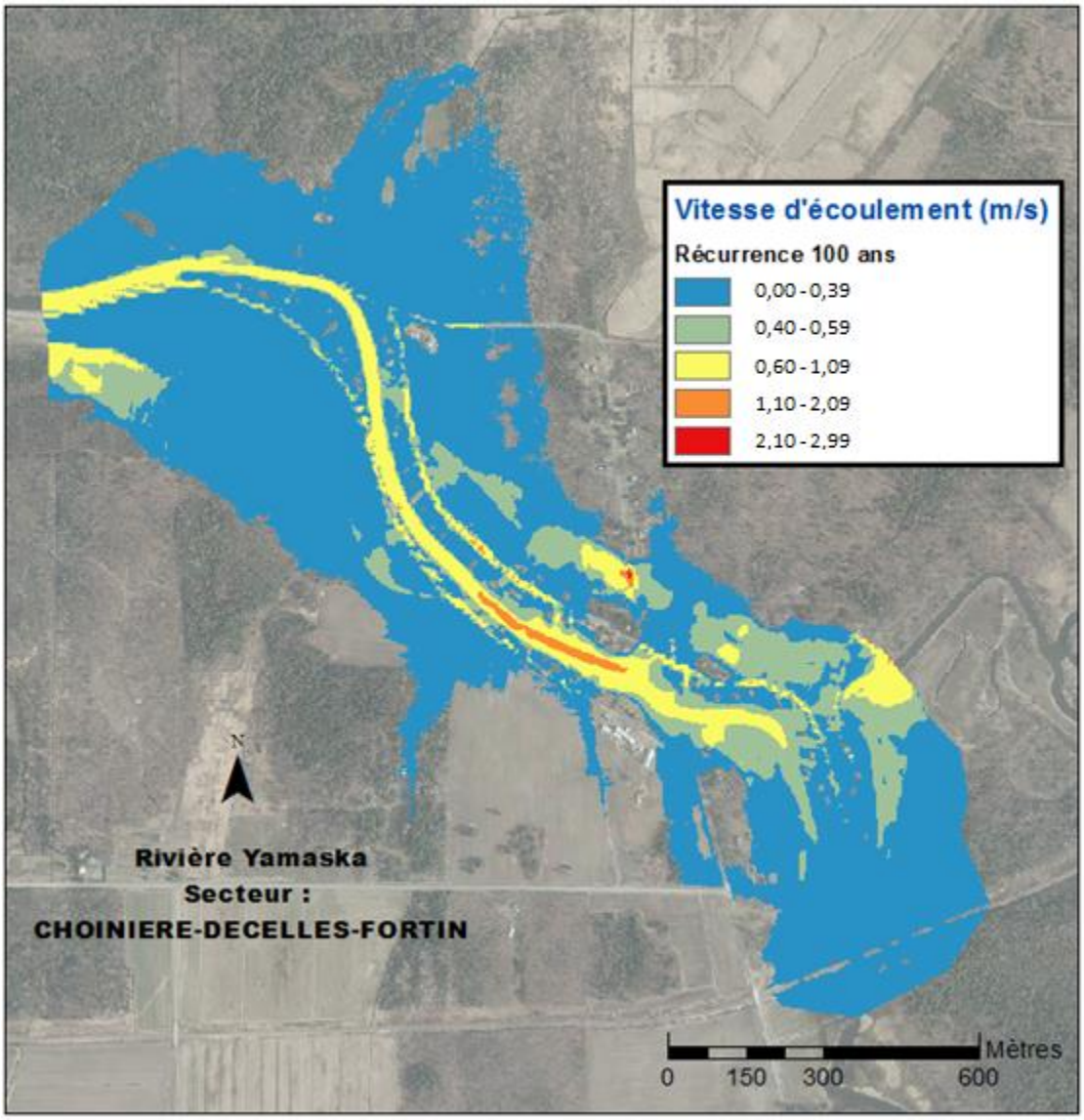


Figure 62 : Carte de vitesse d'écoulement pour la récurrence 100 ans

ANNEXE 7 : CARTOGRAPHIE DES RISQUES LIÉS AUX INONDATIONS

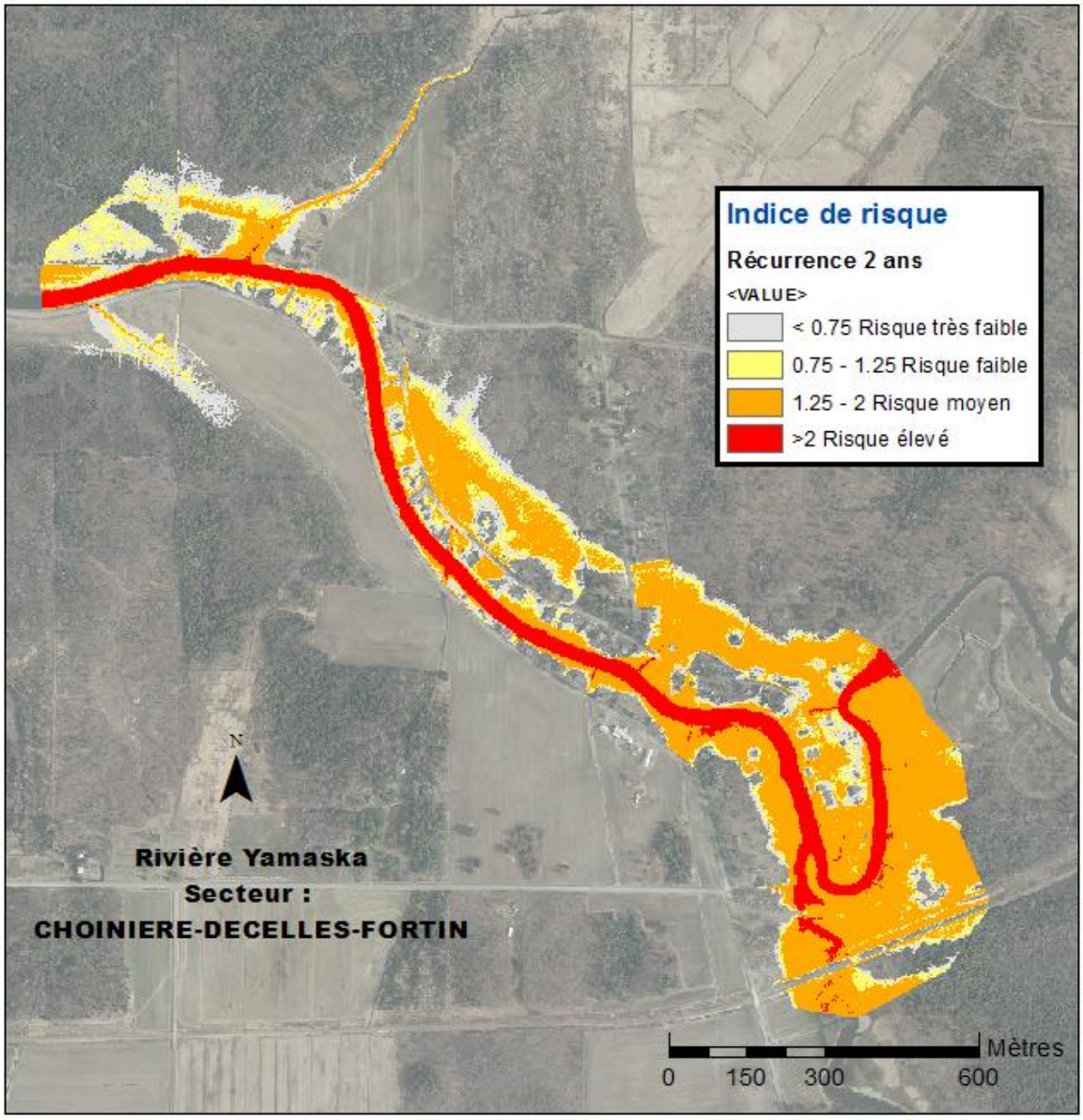


Figure 63 : Carte du risque pour la récurrence 2 ans

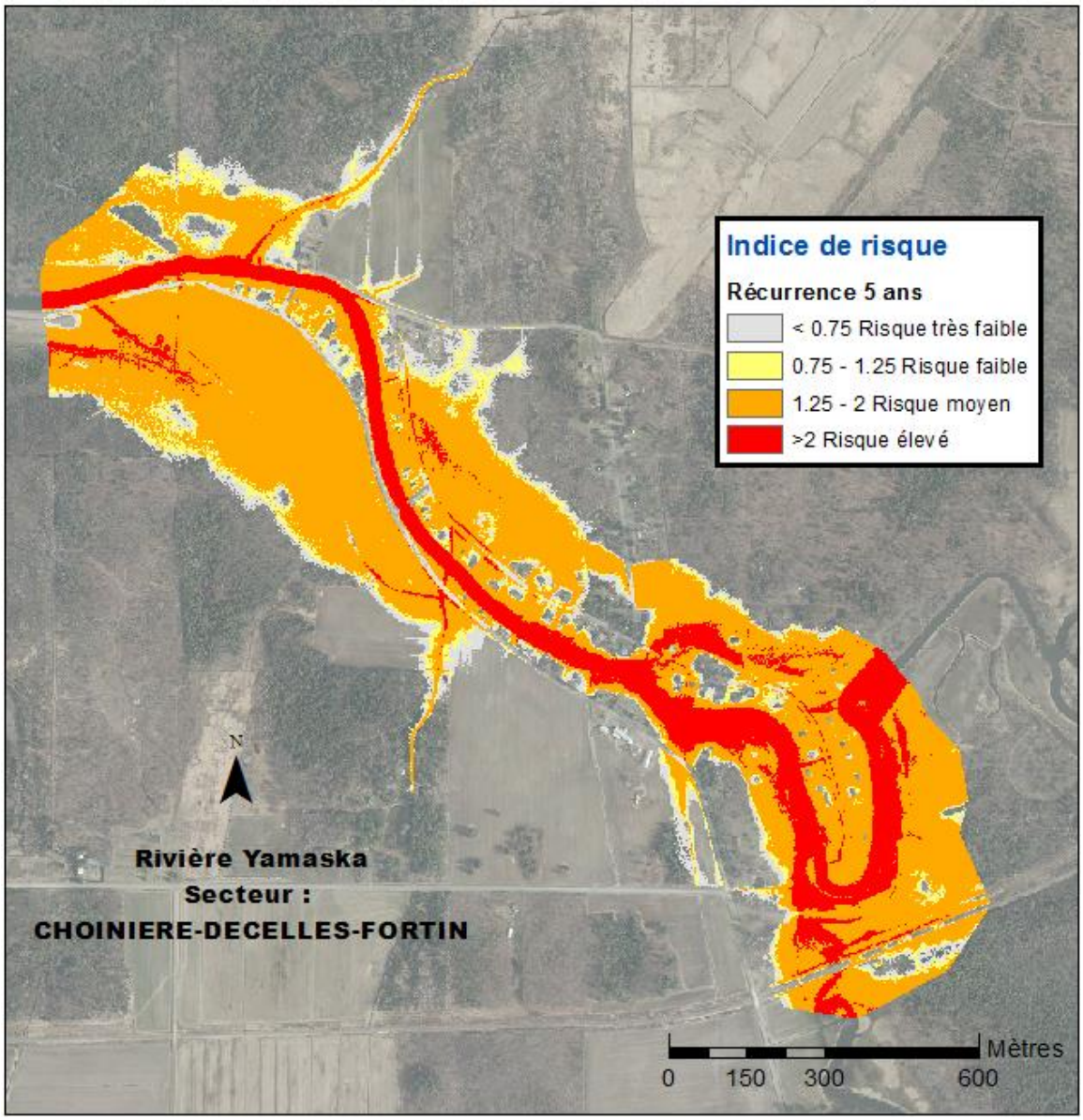


Figure 64 : Carte du risque pour la récurrence 5 ans

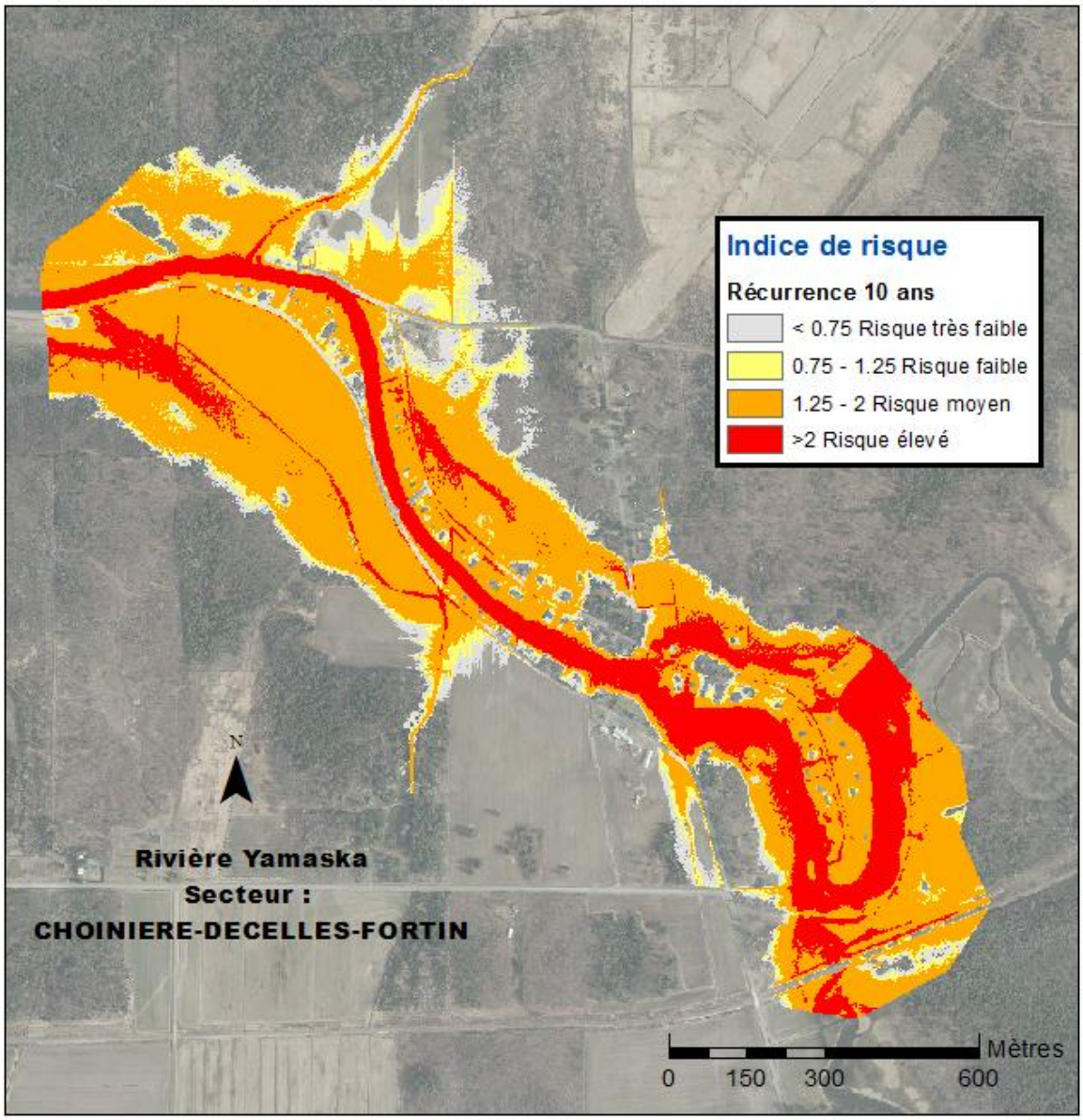


Figure 65 : Carte du risque pour la récurrence 10 ans

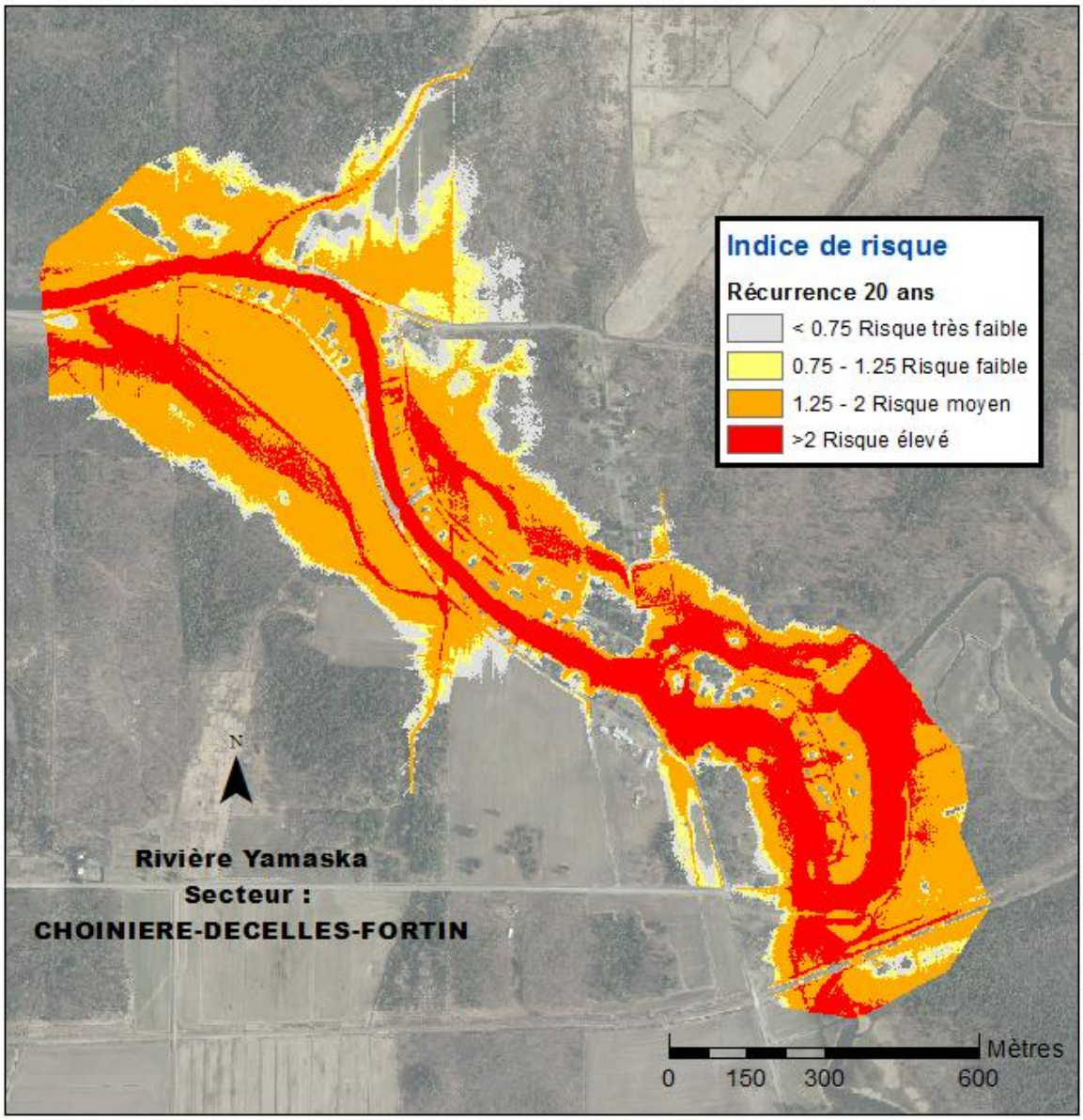


Figure 66 : Carte du risque pour la récurrence 20 ans

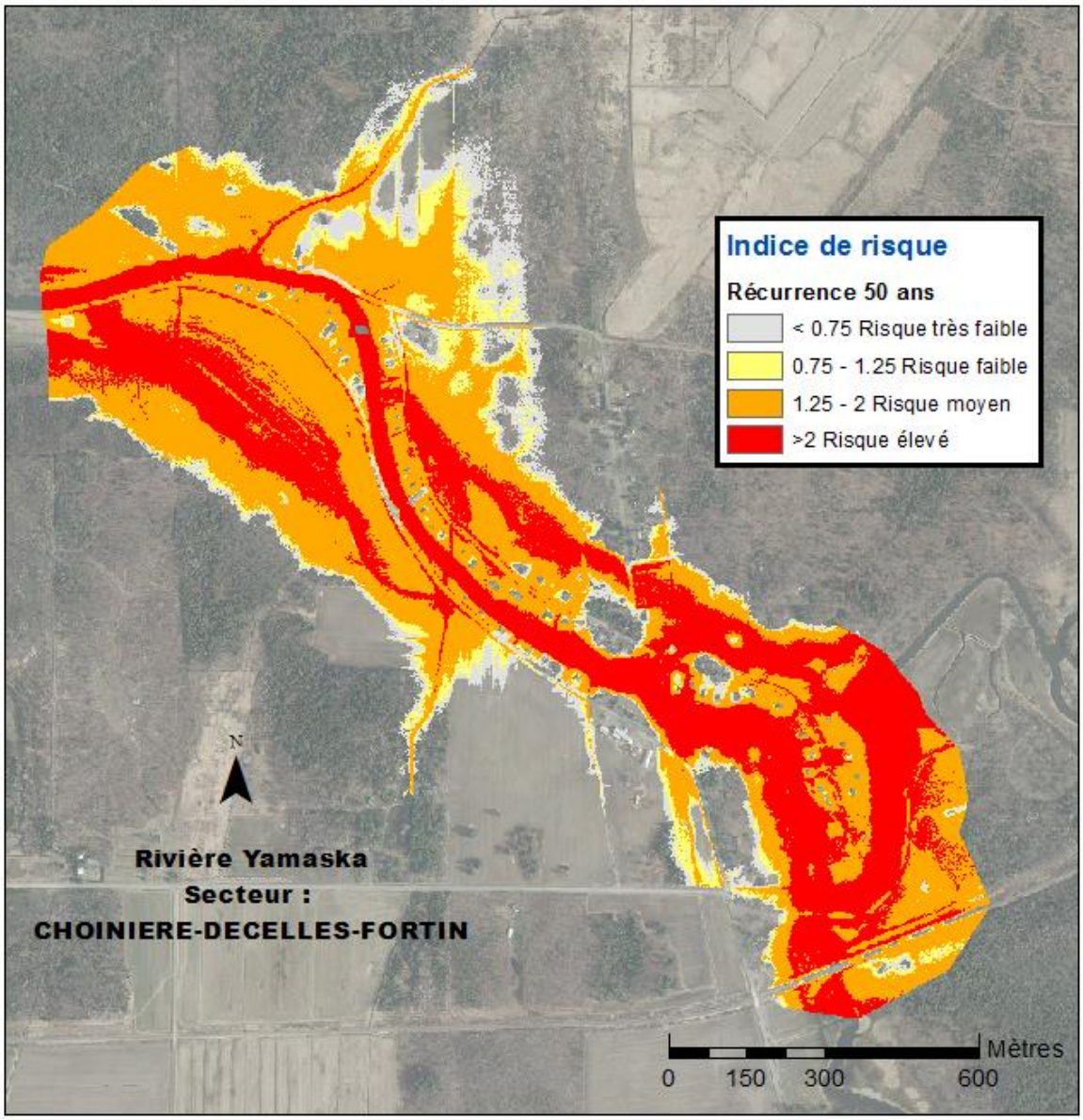


Figure 67 : Carte du risque pour la récurrence 50 ans

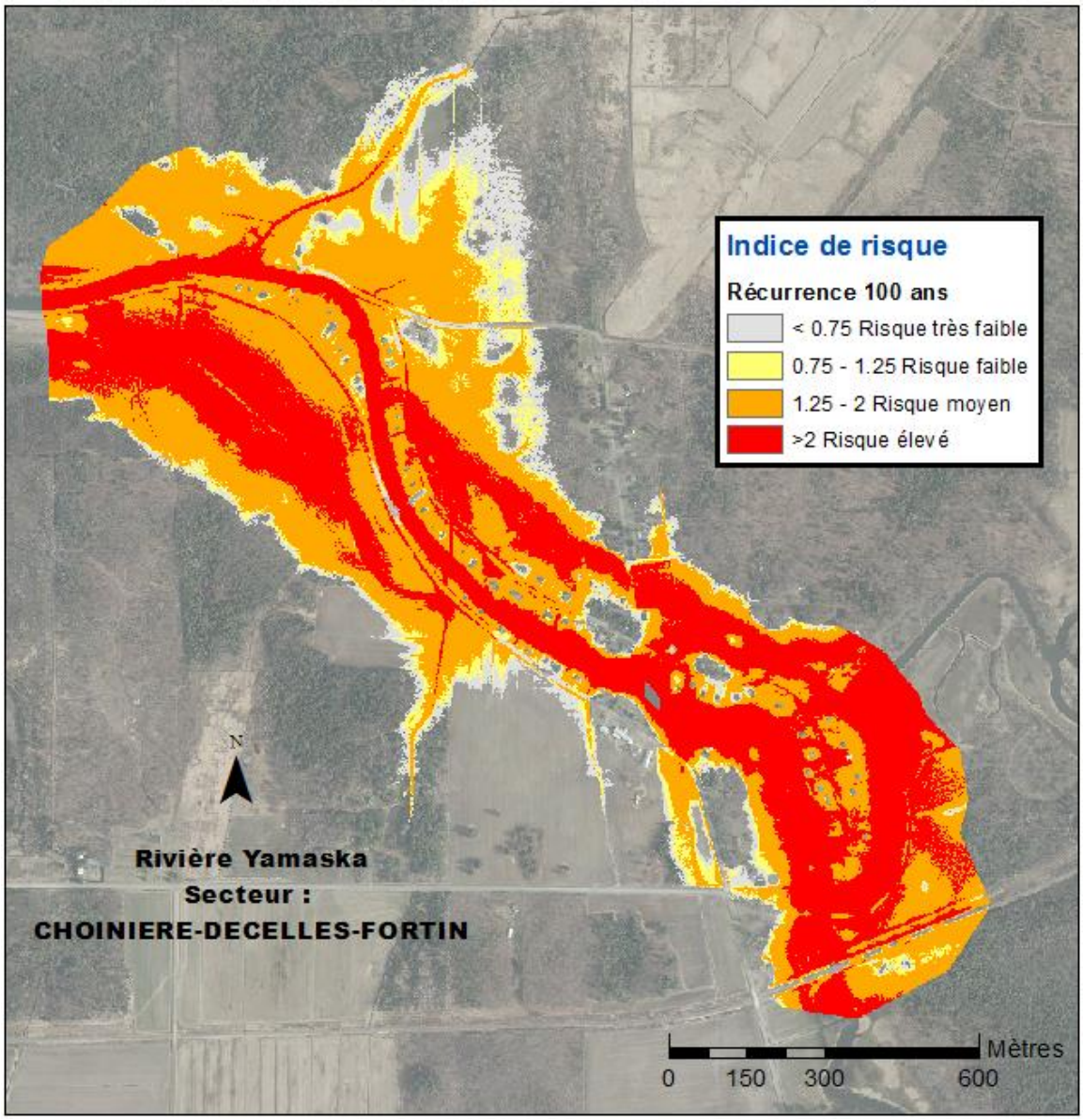


Figure 68 : Carte du risque pour la récurrence 100 ans

ANNEXE 8 : QUESTIONNAIRE AUPRÈS DES RÉSIDENTS DE LA ZONE À L'ÉTUDE À BRIGHAM

QUESTIONNAIRE

ÉTUDE DU RISQUE D'INONDATIONS DANS LE SECTEUR DES RUES DECELLES, FORTIN ET DU CHEMIN CHOINIÈRE

Téléphone : _____

Courriel : _____

Afin d'aider l'INRS à mener à bien son étude, veuillez répondre aux questions suivantes au meilleur de votre connaissance.

---

1. À quelle date avez-vous emménagé dans le secteur ?

   _____

2. Quelle est l'année de construction de votre résidence ?

   _____

3. Votre résidence est-elle munie d'un sous-sol?

   ☐OUI

   ☐NON

4. Si oui, votre résidence possède-t-elle un sous-sol habitable?

   ☐ OUI

   ☐ NON

5. Quel est le nombre d'étages de votre résidence, excluant le sous-sol ?

   ☐ 1
   ☐ 2
   ☐_____

6. Votre résidence située dans le secteur concerné est-elle votre :

☐ Résidence principale ou ☐ secondaire?

7. Quels sont les matériaux de construction de votre résidence?

Extérieur
☐ Brique ou pierre
☐ Déclin de bois
☐ Vinyle
☐ Autre _____

Intérieur
☐ Gypse
☐ Bois
☐ Autre _____

8. Quelle est la valeur approximative du contenu de votre résidence?

☐ Inférieur à 1 000 $
☐ Entre 1 000 $ et 3 000 $
☐ Entre 3 001 $ et 5 000 $
☐ Entre 5 001 $ et 10 000 $
☐ Entre 10 001 $ et 20 000 $
☐ Entre 20 001 $ et 30 000 $
☐ Autre : _____$

INONDATION IRÈNE 27-29 août 2011

9. Lors de l'inondation créée par la tempête Irène en août 2011, l'eau a-t-elle monté?

Au sous-sol : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces

Au rez-de-chaussée : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces

10. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés à la structure de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

11. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés au contenu de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

12. Le montant réclamé au Ministère de la Sécurité publique? (s'il y a lieu)

_____$

13. Le montant obtenu du Ministère de la Sécurité publique?

_____$

INONDATION 2006

14. Si possible, pouvez-vous identifier à quelle date les inondations de 2006 ont eu lieu?

_____

_____

15. Lors de l'inondation de 2006 que vous avez identifiée à la question précédente, l'eau a-t-elle monté.

Au sous-sol : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces

Au rez-de-chaussée : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces

16. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés à la structure de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

17. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés au contenu de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

18. Le montant réclamé au Ministère de la Sécurité publique?

_____$

19. Le montant obtenu du Ministère de la Sécurité publique?

_____$

INONDATION DE VOTRE CHOIX

20. Hormis les deux événements ci-haut mentionnés, quelle est l'inondation la plus importante que vous avez eu à subir?

_____

_____

_____

21. Lors de l'inondation mentionnée à la question précédente, l'eau a-t-elle monté?

Au sous-sol : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces
Au rez-de-chaussée : ☐ OUI ☐ NON
Si oui, à quelle hauteur :
_____ cm
_____ pouces

22. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés à la structure de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

23. À combien de $ chiffrez-vous les dommages causés au contenu de votre résidence lors de cette inondation?

_____$

24. Le montant réclamé au Ministère de la Sécurité publique?

_____$

25. Le montant obtenu du Ministère de la Sécurité publique?

_____$

Considérant la fréquence des inondations dans votre secteur préféreriez-vous avoir accès à :

☐ Un programme de rachat de votre propriété au prix de l'évaluation municipale.

OU

☐ Avoir accès à un programme d'amélioration de l'immunisation de votre résidence contre les inondations.

VOS COMMENTAIRES

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

ANNEXE 9 : RAPPORT DÉTAILLÉ DE L'ARPENTEUR-GÉOMÈTRE CONTENANT LA HAUTEUR DE PREMIERS PLANCHERS

Note : Cette annexe n'est pas disponible au public puisqu'elle contient des renseignements personnels.

ANNEXE 10 : RAPPORT D'INGÉNIEUR CIVIL

NOTE TECHNIQUE

S LEBLANC CONSULTANT
Gestion de projet • Ingénierie

581 997-9966
simon@sleblancconsultant.com

Note technique – Rehaussement Brigham

Objet : Note technique rattachée à l'estimation préliminaire des coûts de rehaussement de deux rues existantes dans la municipalité de Brigham

Projet : 182004 – Rehaussement de la rue Decelles et du chemin Choinière à Brigham

Client : INRS – Centre Eau Terre Environnement

Date : 15-05-2018

Préparé par : Sébastien Mercier, ing. jr.

Vérifié par : Simon Leblanc, ing. MBA

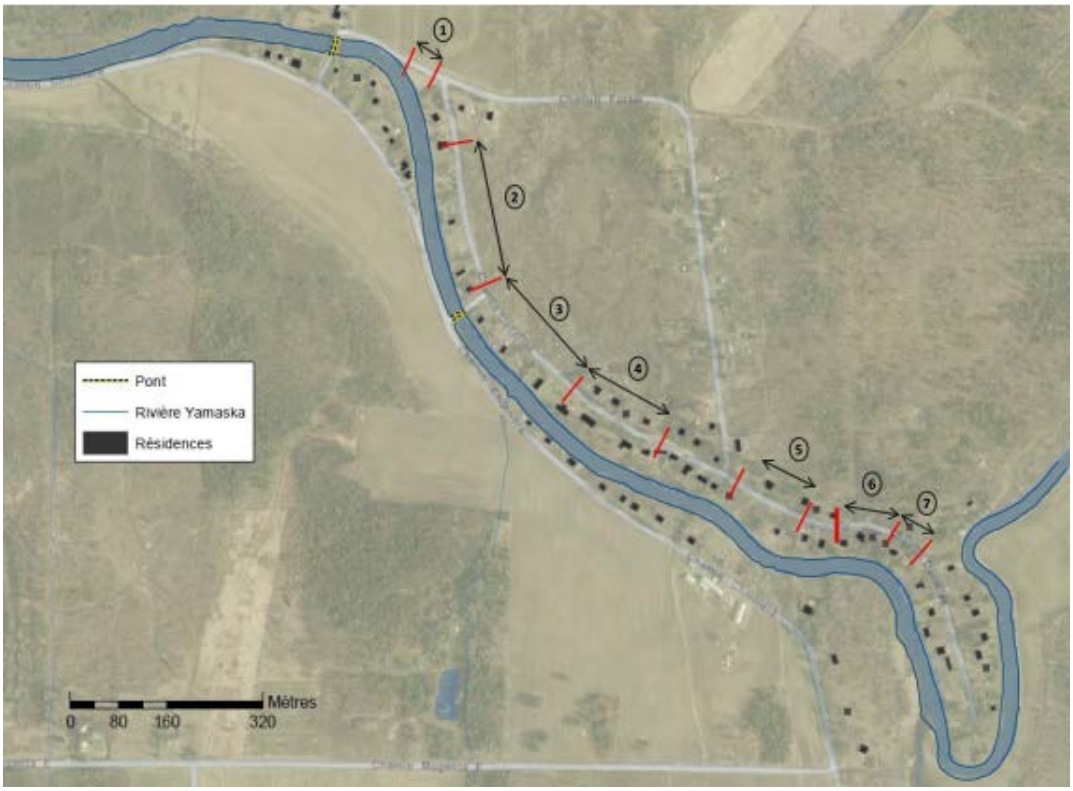
1. INTRODUCTION

S Leblanc Consultant inc. a été mandaté par l'INRS afin de réaliser l'estimation préliminaire du coût des travaux de rehaussement de la rue Decelles et du chemin Choinière dans la municipalité de Brigham (MRC de Brome-Missisquoi). Dans le cadre du présent mandat, nous avons comparé différentes options possibles afin de sélectionner la solution la plus efficace et économique afin de contrer les inondations et la moins dommageable pour les propriétés des secteurs touchés par les travaux. Pour faire suite à la sélection de la solution retenue préliminairement, l'estimation du coût des travaux nécessaires au rehaussement des deux rues à l'étude a été réalisée.

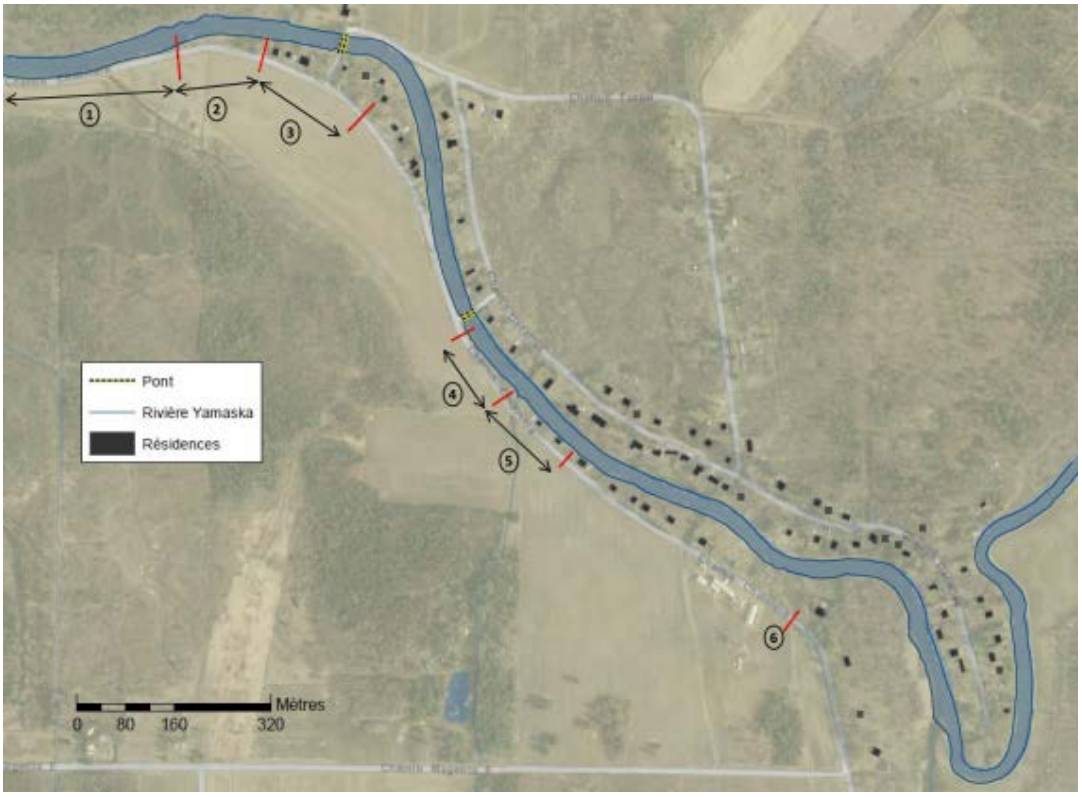
Les zones à l'étude sont situées en bordure de la rivière Yamaska, soit la rue Decelles et le chemin Choinière, qui sont situées sur le territoire de la municipalité de Brigham.

Les deux figures suivantes permettent de bien localiser les deux rues en question.

Rue Decelles



Chemin Choinière



2. Niveaux de rehaussement désirés

Les différents niveaux de rehaussement désirés pour chacune des zones ont été fournis par le client (INRS). Le rehaussement maximal pour la rue Decelles est de 86 cm et le rehaussement maximal pour le chemin Choinière est de 50 cm plus haut que le niveau actuel de la chaussée.

3. Étude de différents scénarios possible

Pour les fins de notre analyse, nous avons établis les exigences minimales suivantes afin de nous assurer que les gabarits projetés des rues à rehausser soient acceptables : 1-Voies carrossable d'une largeur de trois (3) mètres; 2- Accotements d'une largeur minimale d'un (1) mètre; 3- Talus extérieur de la plateforme de chaussée ayant des pentes minimales de 1 : 1.

Deux scénarios ont été envisagés pour réaliser les travaux de rehaussement des deux routes à l'étude.

Le premier consiste à diminuer les largeurs des accotements existants proportionnellement au niveau du rehaussement. Les avantages de cette solution sont que les talus extérieurs de la plateforme routière ne sont pas modifiés et aucune acquisition de terrain n'est nécessaire, étant donné que la largeur totale de la rue n'est pas augmentée. Cette option n'implique donc aucun empiétement au-delà des limites d'emprise actuelle.

Le deuxième scénario analysé consiste à élargir un seul côté de la rue, proportionnellement au niveau du rehaussement. Les avantages de cette solution sont que les largeurs des rues peuvent être ajustées afin d'obtenir des voies et des accotements plus larges et les pentes de talus peuvent être adoucies.

Il est important de noter qu'une correspondance provenant d'un représentant de la municipalité de Brigham nous a clairement indiqué que les deux chemins à l'étude sont de juridiction municipale et peuvent faire l'objet d'un rehaussement et/ou rétrécissement et/ou déplacement si cela peut aider à la situation actuelle des résidents riverains, en regard des problématiques liées aux inondations récurrentes dans ce secteur.

Le premier scénario est priorisé pour les deux rues à l'étude, car il nécessite beaucoup moins d'interventions et qu'il est par conséquent, beaucoup moins coûteux et possible à réaliser dans un délai beaucoup plus court. Toutefois, au terme d'une analyse plus approfondie de ce projet, s'il était impossible de satisfaire aux exigences minimales énoncées précédemment (à cause d'un rétrécissement trop important de la chaussée) le deuxième scénario pourrait alors être appliqué afin de permettre de répondre aux exigences en matière de géométrie routière.

4. Description des travaux à réaliser

4.1 Rue Decelles

La rue Decelles est une rue municipale non revêtue (surface en gravier) avec quelques entrées résidentielles, en gravier pour la presque totalité. La première étape des travaux proposée serait la scarification de la couche supérieure de matériau granulaire, afin de permettre l'uniformité de la couche en place et d'assurer une bonne adhérence avec le nouveau MG-20.

Par la suite, les travaux de rehaussement de la chaussée existante consisteront en l'ajout d'une couche de MG-20 sur la pleine largeur de la rue (accotements inclus), compacté par couche de 300 mm maximum afin de respecter les niveaux de rehaussements demandés. Les premiers mètres des entrées charretières devront être corrigés en MG-20, afin d'harmoniser le nouveau profil de la rue avec celui des entrées d'auto existantes.

Selon l'interprétation des photos découlant de notre visite du site (Avril 2018), toutes les entrées privées dans les zones de rehaussement semblent être munies de ponceaux d'entrées privés, lorsqu'il y a des fossés en façade d'un lot. Toutefois, étant donné la présence de neige et de sédiment dans certains fossés, une quantité provisionnelle de 50 m linéaires de ponceau PEHD 300 mm a été prévue à l'estimation de la rue afin de prévoir la situation hypothétique où le rehaussement de la chaussée entraînerait l'installation de ponceaux supplémentaires sous des entrées qui en sont dépourvues présentement.

4.2 Chemin Choinière

Le chemin Choinière est un chemin municipal asphalté avec quelques entrées résidentielles en gravier. La première étape des travaux préliminairement prévu consiste à enlever la couche de pavage existante, évaluée à environ 60 mm d'épaisseur. Pour ce faire, il y a deux options possibles, soit le décohésionnement ou le retrait du pavage existant par excavation.

Le décohésionnement du pavage consiste à fragmenter la couche de pavage et la mélanger à la couche supérieure de la fondation existante pour ensuite la compacter en place et former une nouvelle fondation granulaire. Cette méthode permet de récupérer le pavage existant et de diminuer la quantité de matériaux granulaire (MG-20) nécessaire au rehaussement de la rue.

Le retrait du pavage existant consiste simplement à enlever le pavage par excavation, sans toutefois le récupérer. La gestion des rebuts de pavage et la mise en place d'une quantité additionnelle de MG-20 afin de combler l'épaisseur de l'ancien pavage sont à prévoir lors de l'utilisation de cette méthode.

L'option du décohésionnement du pavage est à prioriser selon nous, car elle nécessite moins d'intervention et elle est par conséquent moins coûteuse.

Les travaux nécessaires au rehaussement de la chaussée existante consistent à ajouter une couche de MG-20 sur la pleine largeur de la rue (accotements inclus), compacté par couche de 300 mm maximum, afin de respecter les niveaux de rehaussements demandés, moins l'épaisseur du nouveau pavage à mettre en place. L'épaisseur de pavage est fixée à 100 mm, soit une couche de base en ESG-14 de 60 mm et une couche de roulement en ESG-10 de 40 mm. Les accotements seraient réalisés en MG-20, tels que ceux de la route existante.

Pour les secteurs où le rehaussement nécessaire est inférieur à 100 mm, seulement le rehaussement des accotements nécessitera une quantité additionnelle de MG-20, car le décohésionnement du pavage existant et l'épaisseur du nouveau pavage suffiront à combler le niveau de rehaussement visé.

4.3 Chemin Choinière (Élargissement de la rue)

À l'étape actuelle du projet et avec les informations dont nous disposons, il est difficile d'évaluer si le scénario consistant à diminuer les largeurs des accotements existants, proportionnellement aux niveaux de rehaussements demandés, permettra de respecter les exigences minimales de largeurs de voies et de l'accotement dans chacun des secteurs touchés par les travaux. Les secteurs où un élargissement de la rue

pourrait être nécessaire sont les secteurs 1 et 2 (voir figure en introduction). L'élargissement du côté opposé à la rivière est priorisé afin de ne pas augmenter la pente du talus existant du côté de la rivière. Les endroits critiques sont ceux où le niveau de rehaussement demandé est le plus important.

Advenant le cas où l'élargissement de la rue serait nécessaire, des quantités provisionnelles de reprofilage de fossé, enrochement 100-200 mm, allongement de ponceaux en PEHD et du MG-20 supplémentaire pour une longueur totale de 100 mètres ont été prévues dans notre estimation des coûts

5. Deuxième solution pour chemin Choinière

Cette réfection consiste en la réfection totale du chemin Choinière entre le début du premier tronçon jusqu'à la fin du dernier tronçon visé par la présente étude (voir croquis présenté en introduction). Cette possibilité consiste à décohésionner la totalité du pavage en place et à utiliser le surplus de matériel produit pour rehausser le chemin. Les avantages de cette proposition sont la disparition de la totalité du plan de fissuration sur le chemin Choinière, même dans les tronçons qui ne sont pas à rehausser, la diminution des quantités de MG-20 à acheminer jusqu'au chantier et l'augmentation de la durée de vie du chemin Choinière. Cette proposition permettrait d'avoir un tronçon de 1,7 km de route nouvellement pavée comparativement à 1 km pour la première solution.

6. Estimé des travaux et des coûts

Une estimation détaillée du coût des travaux de rehaussement de la rue Decelles et du chemin Choinière est disponible en annexe de la présente note technique.

7. Échéancier préliminaire des travaux

La durée approximative des travaux de rehaussement de ces deux routes existante est évaluée à environ 4 semaines, selon la disponibilité des matériaux et la cadence de travail de l'entrepreneur.

8. Conclusion

S Leblanc Consultant inc. a été mandaté par l'INRS afin de réaliser l'estimation préliminaire du coût des travaux de rehaussement de la rue Decelles et du chemin Choinière dans la municipalité de Brigham (MRC de Brome-Missisquoi). Différentes options ont été comparées concernant les travaux à réaliser afin de rehausser le niveau de différents secteurs de la rue Decelles et du chemin Choinière et des méthodes de travail ont été sélectionnées. À partir de ces méthodes, une estimation du coût des travaux rattachée au rehaussement de la rue Decelles et du chemin Choinière a été réalisée. Toutefois, avec les informations dont nous disposons actuellement, il y a certains secteurs pour lesquels des quantités provisionnelles de matériaux supplémentaires ont été calculées afin de répondre à d'éventuelles contraintes difficilement évaluables à cette étape-ci du projet.

L'estimation des coûts rattachés à la réalisation du rehaussement de la rue Decelles (incluant les travaux supplémentaires) s'élève à environ 154 000$ et l'estimation des coûts rattachés à la réalisation du rehaussement du chemin Choinière (incluant les travaux supplémentaires) s'élève à environ 237 000$.

Parmi les prochaines étapes pour la suite du projet, il faudra notamment effectuer une inspection rigoureuse des secteurs touchés par les travaux supplémentaires afin de déterminer la nécessité de réaliser ceux-ci.

Préparé par : _____
Sébastien Mercier, ing. jr

Vérifié par : _____
Simon Leblanc, ing. MBA

Estimation des coûts

Rue Decelles

Description	Quantité	unité	Prix unitaire	Montant
	Secteur 1			
1.1 - Scarification de la surface granulaire	320	m²	3,00 $	960,00 $
1.2 - Structure en MG-20	16	m³	40,00 $	640,00 $
Total du secteur				**1 600,00 $**
	Secteur 2			
2.1 - Scarification de la surface granulaire	2000	m²	3,00 $	6 000,00 $
2.2 - Structure en MG-20	820	m³	40,00 $	32 800,00 $
2.3 - Réfection des entrées charetières	10	unité	250,00 $	2 500,00 $
Total du secteur				**41 300,00 $**
	Secteur 3			
3.1 - Scarification de la surface granulaire	1840	m²	3,00 $	5 520,00 $
3.2 - Structure en MG-20	450,8	m³	40,00 $	18 032,00 $
3.3 - Réfection des entrées charetières	7	unité	250,00 $	1 750,00 $
Total du secteur				**25 302,00 $**
	Secteur 4			
4.1 - Scarification de la surface granulaire	1440	m²	3,00 $	4 320,00 $
4.2 - Structure en MG-20	223,2	m³	40,00 $	8 928,00 $
4.3 - Réfection des entrées charetières	12	unité	250,00 $	3 000,00 $
Total du secteur				**16 248,00 $**
	Secteur 5			
5.1 - Scarification de la surface granulaire	1040	m²	3,00 $	3 120,00 $
5.2 - Structure en MG-20	447,2	m³	40,00 $	17 888,00 $
5.3 - Réfection des entrées charetières	6	unité	250,00 $	1 500,00 $
Total du secteur				**22 508,00 $**
	Secteur 6			
6.1 - Scarification de la surface granulaire	800	m²	3,00 $	2 400,00 $
6.2 - Structure en MG-20	200	m³	40,00 $	8 000,00 $
6.3 - Réfection des entrées charetières	6	unité	250,00 $	1 500,00 $
Total du secteur				**11 900,00 $**
	Secteur 7			
7.1 - Scarification de la surface granulaire	480	m²	3,00 $	1 440,00 $
7.2 - Structure en MG-20	204	m³	40,00 $	8 160,00 $
7.3 - Réfection des entrées charetières	3	unité	250,00 $	750,00 $
Total du secteur				**10 350,00 $**
			Sous-total de la rue	**129 208,00 $**
	Travaux supplémentaire			
Ponceaux 300 mm pour entrée charetière	50	m. lin.	500,00 $	**25 000,00 $**
			Total de la rue	**154 208,00 $**

Estimation des coûts

Chemin Choinière

Description	Quantité	unité	Prix unitaire	Montant
Secteur 1				
1.1 - Décohésionnement de la surface pavée	1320	m²	5,00 $	6 600,00 $
1.2 - Fondation granulaire en MG-20	352	m³	40,00 $	14 080,00 $
1.3 - Couche de base (ESG - 14)	190	t	90,00 $	17 100,00 $
1.4 - Couche deroulement (ESG - 10)	127	t	90,00 $	11 430,00 $
1.5 - Mise en place des accotements	440	m²	30,00 $	13 200,00 $
Total du secteur				**62 410,00 $**
Secteur 2				
2.1 - Décohésionnement de la surface pavée	900	m²	5,00 $	4 500,00 $
2.2 - Fondation granulaire en MG-20	180	m³	40,00 $	7 200,00 $
2.3 - Couche de base (ESG - 14)	130	t	90,00 $	11 700,00 $
2.4 - Couche deroulement (ESG - 10)	87	t	90,00 $	7 830,00 $
2.5 - Mise en place des accotements	300	m²	30,00 $	9 000,00 $
Total du secteur				**40 230,00 $**
Secteur 3				
3.1 - Décohésionnement de la surface pavée	1200	m²	5,00 $	6 000,00 $
3.2 - Fondation granulaire en MG-20	40	m³	40,00 $	1 600,00 $
3.3 - Couche de base (ESG - 14)	173	t	90,00 $	15 570,00 $
3.4 - Couche deroulement (ESG - 10)	115	t	90,00 $	10 350,00 $
3.5 - Mise en place des accotements	400	m²	30,00 $	12 000,00 $
3.6 - Réfection des entrées charetières	8	unité	250,00 $	2 000,00 $
Total du secteur				**47 520,00 $**
Secteur 4				
4.1 - Décohésionnement de la surface pavée	780	m²	5,00 $	3 900,00 $
4.2 - Couche de base (ESG - 14)	112	t	90,00 $	10 080,00 $
4.3 - Couche deroulement (ESG - 10)	75	t	90,00 $	6 750,00 $
4.4 - Mise en place des accotements	260	m²	30,00 $	7 800,00 $
Total du secteur				**28 530,00 $**
Secteur 5				
5.1 - Décohésionnement de la surface pavée	900	m²	5,00 $	4 500,00 $
5.2 - Couche de base (ESG - 14)	130	t	90,00 $	11 700,00 $
5.3 - Couche deroulement (ESG - 10)	86	t	90,00 $	7 740,00 $
5.4 - Mise en place des accotements	300	m²	30,00 $	9 000,00 $
5.5 - Réfection des entrées charetières	3	unité	250,00 $	750,00 $
Total du secteur				**33 690,00 $**
Secteur 6				
6.1 - Décohésionnement de la surface pavée	120	m²	5,00 $	600,00 $
6.2 - Fondation granulaire en MG-20	4	m³	40,00 $	160,00 $
6.3 - Couche de base (ESG - 14)	17	t	90,00 $	1 530,00 $
6.4 - Couche deroulement (ESG - 10)	12	t	90,00 $	1 080,00 $
6.5 - Mise en place des accotements	40	m²	30,00 $	1 200,00 $
6.6 - Réfection des entrées charetières	1	unité	250,00 $	250,00 $
Total du secteur				**4 820,00 $**
			Sous-total de la rue :	**217 200,00 $**
Travaux supplémentaire				
7.1 - Reprofilage de fossés	100	m.lin	20,00 $	2 000,00 $
7.2 - Enrochement 100 - 200 mm	100	m.lin	50,00 $	5 000,00 $
7.3 - Allongement de ponceaux en PEHD	18	m.lin	500,00 $	9 000,00 $
7.4 - Matériel granulaire (MG-20) supplémentaire	100	m³	40,00 $	4 000,00 $
Sous-total de la rue				**20 000,00 $**
			Total de la rue	**237 200,00 $**

ANNEXE 11 : RAPPORT DU GRAPHISTE POUR LA CONCEPTION D'UN REPÈRE DE CRUE

REPÈRES DE CRUE

CONCEPTION PRÉLIMINAIRE ET COÛTS

BRIGHAM / PHASE 1 / AVRIL 2018

Soda

TÉL. : 418 380-1804

2955 rue de la Faune,
Québec (Québec)
G2A 1J2

WWW.MONSODA.COM

SÉBASTIEN MEUNIER
Propriétaire, Designer et illustrateur
smeunier@monsoda.com

MYLÈNE RENAUD
Designer culturelle et chargée de projet
mrenaud@monsoda.com

PRÉSENTATION

Vous trouverez dans ces quelques pages la première phase d'une étude formelle pour le développement d'un outil d'interprétation et de vulgarisation. La démarche a pour objectif principal de sensibiliser les promeneurs au phénomène complexe qu'est la crue de la rivière Yamaska.

NOUS SOMMES UNE ENTREPRISE EXPERTE EN DESIGN CULTUREL

Née en 2004, **Soda** a gagné une place de choix dans le coeur de ses collaborateurs et clients. Notre jeune succès est attribuable à la fraîcheur de nos idées et à l'efficacité de notre travail. Nous vous offrons ici notre créativité ainsi que notre expérience multidisciplinaire.

À VOTRE SANTÉ !

AXES DE COMMUNICATION

QUOI COMMUNIQUER ET COMMENT ?

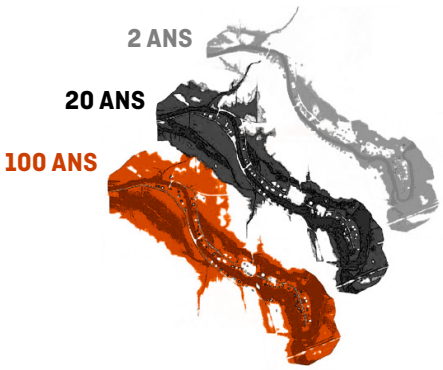
Les repères seront installés sur les voies publiques et permettront de figurer les hauteurs d'eau, leurs récurrences et la probabilité de ces événements dans les années à venir. Voici les différents outils dont seront dotés les repères.

1. INDICATEUR DU NIVEAU DE L'EAU

Repère physique et appel visuel sous la forme d'un mât gradué.

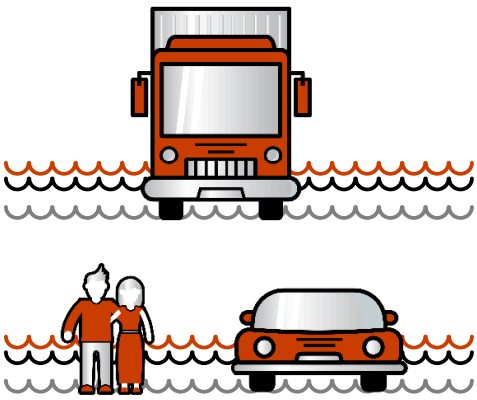
2. MARQUEUR « VOUS ÊTES ICI »

Carte additionnée d'un marqueur de position.



3. CARTES COLORÉES

Récurrence des divers scénarios.



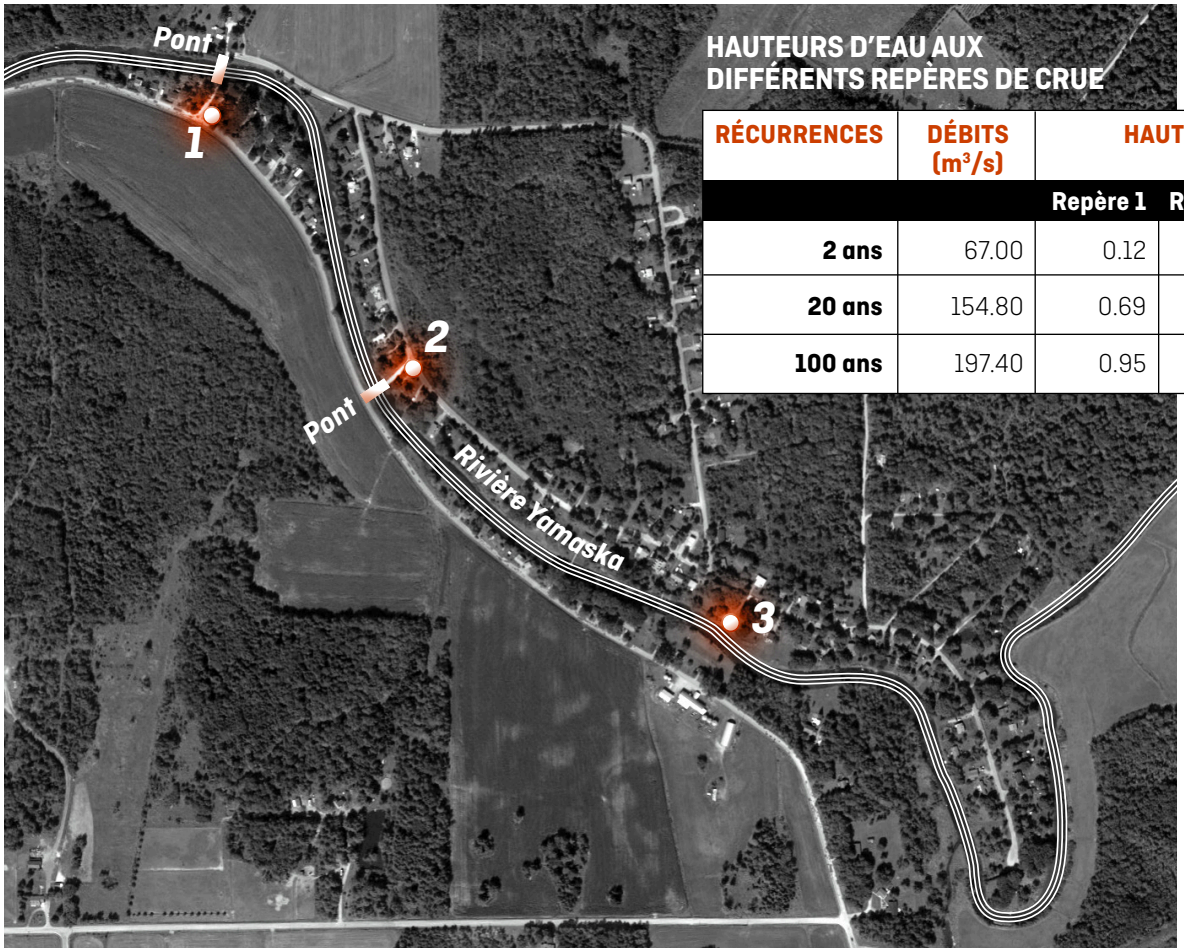
4. CHARTE ILLUSTRÉE DE HAUTEUR D'EAU

Cette charte permettra de saisir les changements de niveaux d'eau à une échelle humaine.

5. PHOTOS D'ARCHIVE

Afin de rendre tangible le sujet, des photos d'archive des lieux innondés seront présentées, lorsque disponibles.

LOCALISATION DES REPÈRES DE CRUE

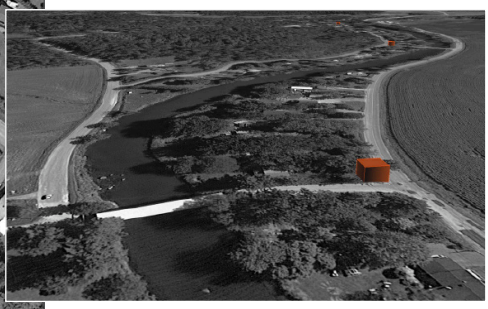


HAUTEURS D'EAU AUX DIFFÉRENTS REPÈRES DE CRUE

RÉCURRENCES	DÉBITS (m^3/s)	HAUTEURS D'EAU (m)		
		Repère 1	Repère 2	Repère 3
2 ans	67.00	0.12	0.42	0.75
20 ans	154.80	0.69	0.99	1.42
100 ans	197.40	0.95	1.22	1.65

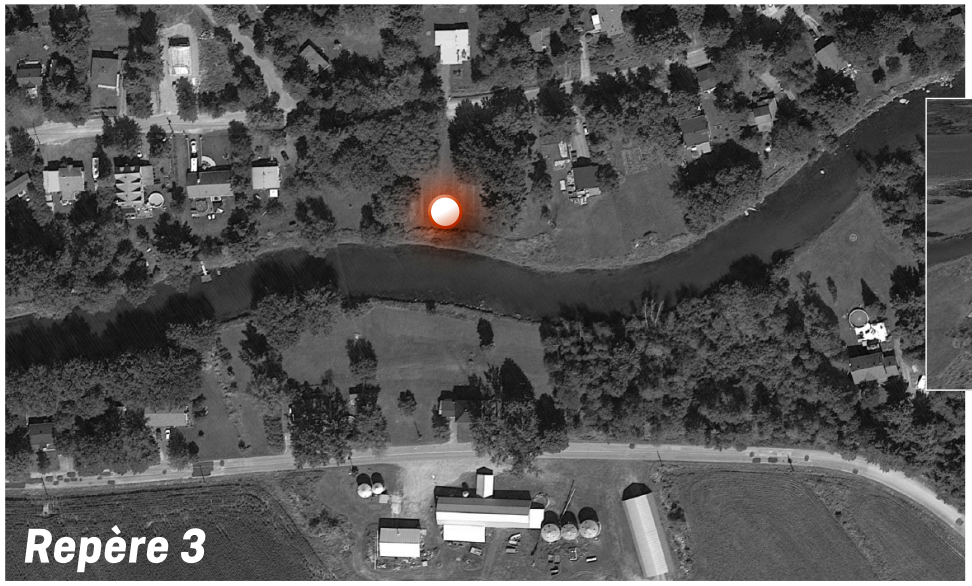
PLAN DE LOCALISATION

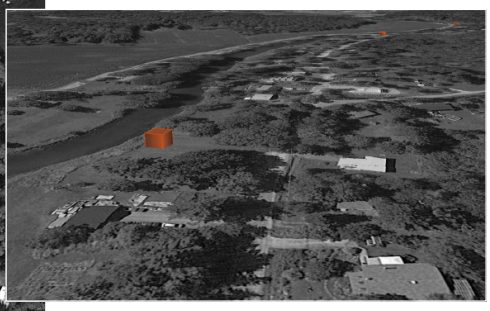
EMPLACEMENTS



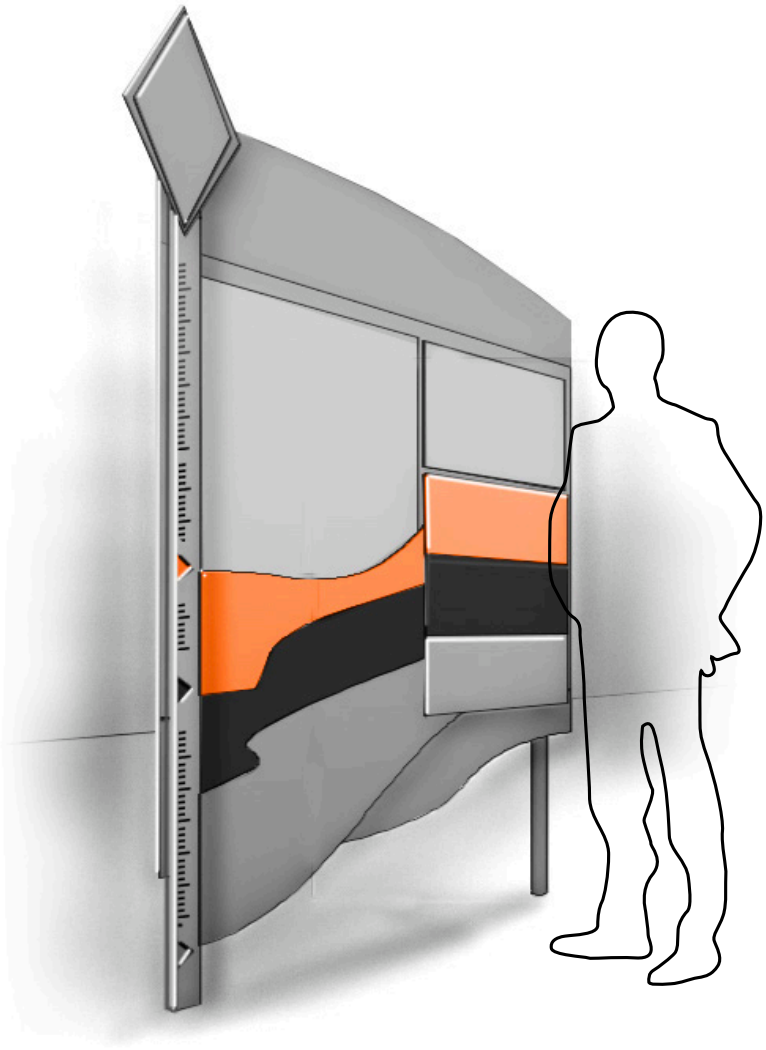
Repère 1

Repère 2



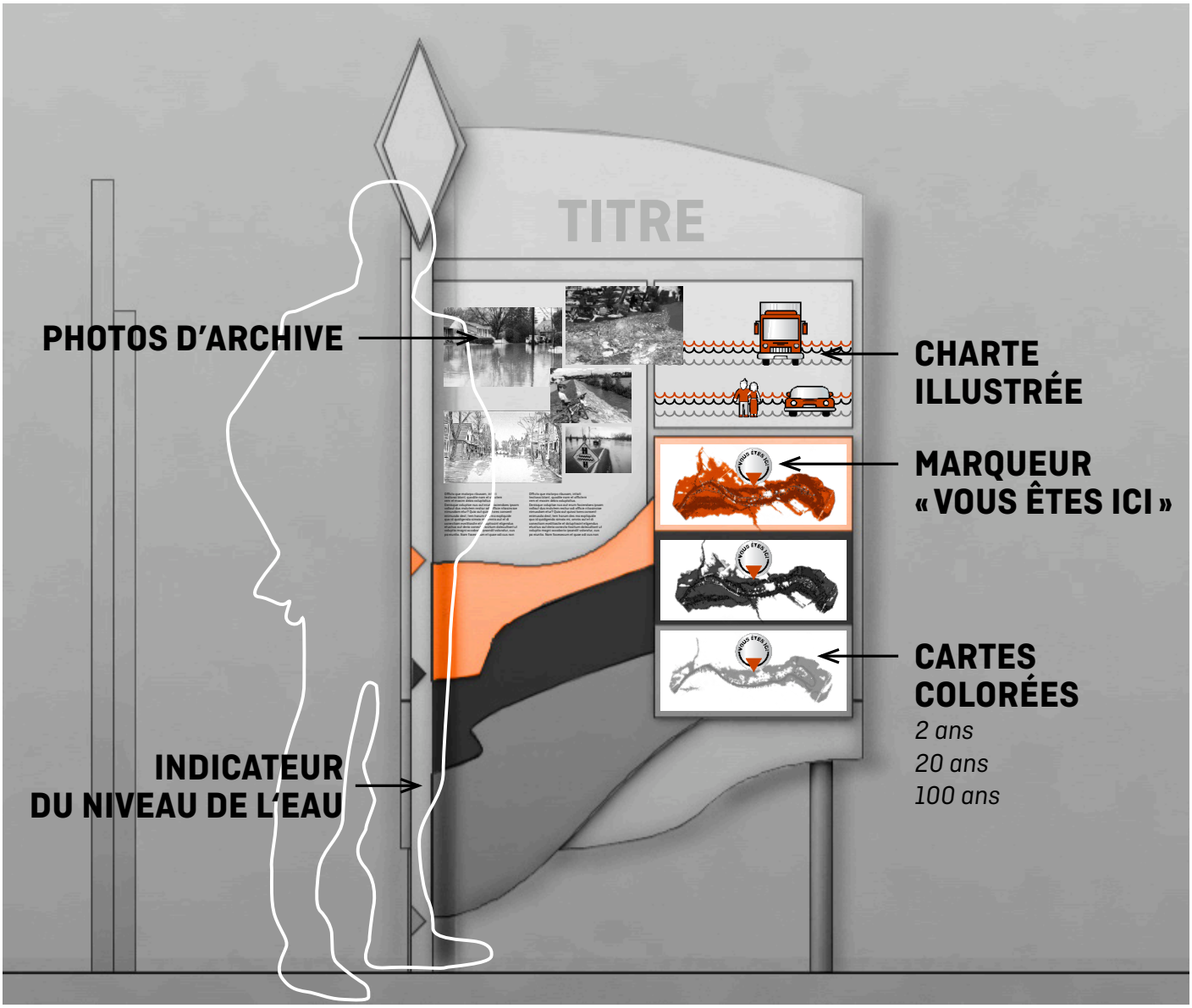


Repère 3



CONCEPT PRÉLIMINAIRE

NOTES CONCEPTUELLES



ESTIMATION BUDGÉTAIRE

Cet estimé est basé sur notre compréhension actuelle du mandat et sur notre expérience avec des projets d'envergure similaire réalisés précédemment.

PROCESSUS DE RÉALISATION

1. Recherche photographique et rédaction du contenu
2. Design final des repères
3. Graphisme
4. Réalisation des plans et devis
5. Production
6. Livraison et installation

ESTIMATION BUDGÉTAIRE CLASSE « D »

CONTENU

Recherche photographique et rédaction du contenu	1280 $

DESIGN

Design final des repères	1536 $
Graphisme	2 432 $
Réalisation des plans et devis	512 $

PRODUCTION

3 unités x 2 940 $	environ 8 820 $

LIVRAISON ET INSTALLATION

Transport inclus	2 380 $

COORDINATION

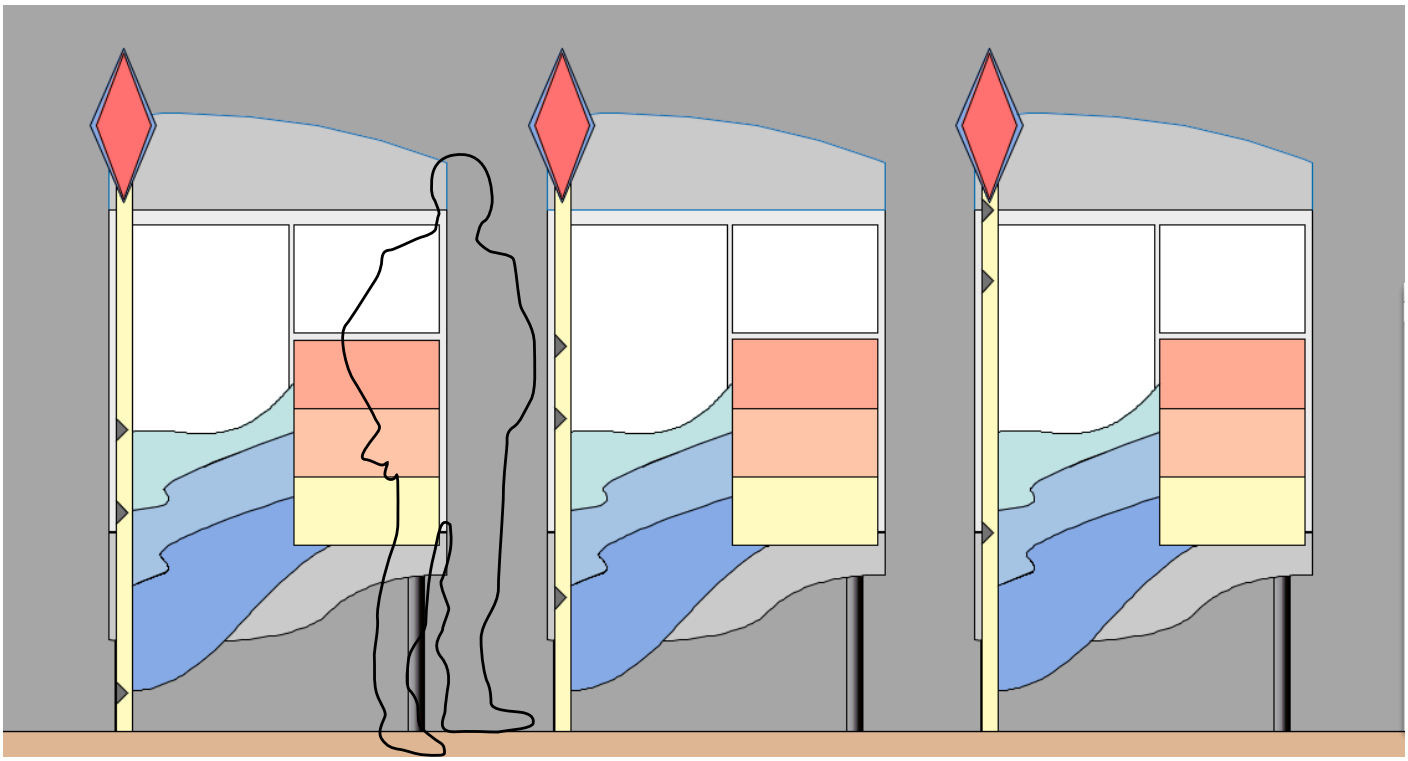
512 $

ESTIMÉ BUDGÉTAIRE : 17 472 $ + tx

Ceci ne constitue pas une soumission officielle. La ventilation finale des coûts sera produite au moment du design définitif en fonction des options retenues.

POUR DISCUSSION

Le mandat inclus trois repères de crue différents avec chacun leurs propres indicateurs du niveau de l'eau variant en fonction des sites d'implantation identifiés. On remarque sur le repère de droite que les derniers indicateurs (flèches) se retrouvent très hautes. L'idée originale était d'adapter la forme des vagues aux niveaux d'eau afin de créer un lien visuel. Est-ce toujours pertinent ? Il est possible que cette option soit révisée ou abandonnée lors du design final.



ANNEXE